

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UN  
EQUIPO PARA PRUEBA DEL ESTRÉS TERMO-  
MECÁNICO DE CÉLULAS SOLARES DE  
CONCENTRACIÓN**

**Alumno:** D. Valentín Pérez Fernández

**Tutor:** D. Gabriel Sala Pano

**MIEMBROS DEL TRIBUNAL:**

**Presidente:** D. Gabriel Sala Pano

**Vocal:** D. Ignacio Rey-Stolle Prado

**Secretario:** D. Ignacio Antón Hernández

**Suplente:** D. Carlos Algora del Valle

**FECHA DE LECTURA:**

**CALIFICACIÓN:**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO  
DE UN EQUIPO PARA PRUEBA DEL  
ESTRÉS TERMO-MECÁNICO DE  
CÉLULAS SOLARES DE  
CONCENTRACIÓN**

**VALENTÍN PÉREZ FERNÁNDEZ**

**2014**





## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a Gabriel Sala la confianza que ha depositado en mí brindándome la oportunidad de iniciarme como ingeniero otorgándome el privilegio de realizar un proyecto de tales dimensiones. Gracias por todos los conocimientos adquiridos, por el apoyo constante recibido y por motivarme a sacar lo mejor de mí mismo.

Agradecer especialmente a Ignacio Antón todo el tiempo que ha dedicado a la construcción del equipo y a guiarme en todo momento en su desarrollo. Gracias por tus consejos, lecciones y, en definitiva, por todo lo que me has enseñado.

Cómo no, dar las gracias a todos los demás componentes del grupo ISI que siempre han estado dispuestos a resolverme cualquier mínima duda y a ayudarme en todo lo que he necesitado. De veras, ¡Gracias!.

Por supuesto, gracias a toda la gente del IES por su compañerismo y por el buen ambiente de trabajo que se respira que hacen que nadie quiera dejar ese lugar. Gracias por tratarme como me habéis tratado, me habéis hecho sentir en casa.

A mis dos compañeros y amigos inseparables de la carrera, Álvaro y Visa, por estar ahí en los buenos y en los no tan buenos momentos, por apoyarme siempre y por todas las experiencias que hemos vivido juntos a lo largo de estos años y las que están por venir.

Finalmente, quiero dar las gracias a mi familia por hacer de mí la persona que soy y por apoyarme siempre en las decisiones que he tomado. En especial a mi madre, que siempre ha confiado en mí y que ha luchado incansablemente contra viento y marea para que mis hermanos y yo podamos optar a todas las oportunidades que la vida nos ofrece. A mi padre y a mi abuelo Valentín que, aunque ya no estén con nosotros, son mi luz y mi guía en el camino. Donde quiera que estéis, mi meta en la vida es hacer que os sintáis orgullosos de mí.

## RESUMEN

El ciclo térmico natural de la célula y receptores en módulos CPV (*Concentrated PhotoVoltaic*) es considerado un punto débil en la operación de campo real de estos dispositivos, así como la fluctuación entre valores altos y bajos de niveles de irradiancia incidente en la célula, comúnmente causadas por nubes, produce un estrés termo-mecánico que puede ser motivo de fallo.

La normativa IEC 6218 ha tenido en cuenta esta serie de problemas a la hora de diseñar una norma de calificación y homologación para módulos CPV. En concreto, este proyecto se va a basar en el test denominado "*Thermal cycling test*" que realiza un ciclo térmico en la base de la célula mientras se le inyectan pulsos de corriente. Sin embargo, este método produce un nivel de estrés un 50% menor que el estrés real en condiciones nominales.

En este proyecto se diseña e implementa la máquina LYSS (*Light cYcling Stress Source*) que trata de realizar dos tipos de ciclos basados en el definido en la IEC 62108 con la variación de utilizar pulsos de luz directa a muy alta irradiancia focalizada en la parte activa de la célula en lugar de los pulsos de corriente mencionados. Con este método se pretende acelerar el proceso de degradación en la célula de manera que en tan solo 2 meses se pueda producir la misma que en 30 años de vida útil de la célula.

En el primer tipo de ciclo la temperatura permanece constante durante la ejecución de los pulsos de luz y, en el segundo se realiza un ciclo térmico que varía entre una temperatura mínima y otra máxima durante estos pulsos. Además, se establece un criterio de fallo basado en la estimación de la resistencia serie de la célula a partir de los valores de su curva característica IV en condiciones de oscuridad.

La metodología del proyecto realizado consiste en realizar un estudio detallado para identificar los componentes necesarios para construir la máquina, adquirirlos, llevar a cabo el montaje de éstos para que la máquina pueda implementar los ciclos diseñados, realizar los experimentos necesarios para caracterizar los diferentes dispositivos que componen la máquina, programar una aplicación de control, monitorización y adquisición de datos que comande la máquina, realizar una serie de pruebas basadas en uno de los ciclos térmico-luminosos diseñados a receptores solares de concentración reales y, por último, observar la degradación que se pudiera producirse en ésta conforme aumenta el número de ciclos realizados analizando su curva IV en condiciones de oscuridad y obteniendo conclusiones sobre la fiabilidad de la célula y/o el receptor CPV.

### **PALABRAS CLAVE**

Sistemas de concentración fotovoltaica, receptores CPV, estrés térmico, estrés mecánico, degradación, fiabilidad, ciclo térmico, ciclo luminoso, IEC 62108

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	i
RESUMEN .....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
GLOSARIO .....	xiii
CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	3
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	3
1.2.1 TIPOS DE CICLO A IMPLEMENTAR .....	5
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	7
CAPÍTULO 2 : FUNDAMENTOS DE CÉLULAS SOLARES Y CRITERIO DE FALLO .....	9
2.1 INTRODUCCIÓN .....	11
2.2 LA CÉLULA SOLAR .....	11
2.3 ESTRUCTURA DE LAS CÉLULAS SOLARES .....	11
2.5 MODELO ELÉCTRICO TEÓRICO .....	12
2.6 CARACTERÍSTICA I-V DE ILUMINACIÓN .....	13
2.6.1 PARÁMETROS DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CÉLULA.....	13
2.6.2 CURVA CARACTERÍSTICA EN OSCURIDAD .....	16
CAPÍTULO 3 : ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA.....	19
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	21
3.2 MÓDULO ÓPTICO .....	21
3.2.1 INTRODUCCIÓN .....	21
3.2.2 LÁMPARA DE ARCO CORTO DE XENÓN .....	22
3.2.2.2 MODELO DE LÁMPARA ESCOGIDO Y PROBLEMAS ENCONTRADOS .....	24
3.2.2.3 MEDIDA DE LA EXTENSIÓN ANGULAR DEL HAZ LUMINOSO DE LA LÁMPARA .....	34
3.2.3 ESPEJO FUERA DEL EJE ( <i>OFF-AXIS MIRROR</i> ) .....	37
3.2 MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	58
3.2.1 INTRODUCCIÓN .....	58

3.2.2 EFECTO PELTIER .....	58
3.2.3 MODELO ESCOGIDO .....	60
3.3 MÓDULO DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	63
3.3.1 INTRODUCCIÓN .....	63
3.3.2 COMPACT DAQ .....	63
3.3.3 CONTROLADOR DEL ACTUADOR LINEAL.....	67
3.3.4 CONTROLADOR DE LA PLACA ENFRIADORA .....	69
3.3.5 MEDIDA CURVA IV EN OSCURIDAD .....	71
3.3.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LA LÁMPARA DE ARCO DE XENÓN .....	73
3.4 ESTRUCTURA FINAL .....	76
CAPÍTULO 4 : DISEÑO DEL SOFTWARE .....	81
4.1 INTRODUCCIÓN .....	83
4.1.1 COMPATIBILIDAD DE LOS DISPOSITIVOS CON LABVIEW .....	83
4.2 MAIN.....	87
4.2.1 PANEL FRONTAL.....	87
4.2.2 ESTRUCTURA INTERNA .....	94
4.3 CONFIGURATION .....	97
4.3.1 PANEL FRONTAL.....	97
4.3.2 ESTRUCTURA INTERNA .....	107
4.4 MONITORING AND CELL POSITION ADJUSTMENT .....	107
4.4.1 PANEL FRONTAL.....	107
4.4.2 ESTRUCTURA INTERNA .....	109
4.5 START SELECTED CYCLE .....	111
4.5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	111
4.5.2 MEASUREMENT .....	112
4.5.3 CYCLING .....	117
4.5.4 STOP.....	123
CAPÍTULO 5 : PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	125
5.1.INTRODUCCIÓN .....	127

5.2 MONTAJE DE LAS CÉLULAS Y CONSIDERACIONES PREVIAS.....	128
5.3 TIPO DE CICLO LARGO REALIZADO .....	133
5.4 ESTADO INICIAL DE LAS CÉLULAS .....	133
5.5 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA SERIE .....	136
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	139
6.1 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	141
6.1.1 CONCLUSIONES.....	141
6.1.2 TRABAJO FUTURO.....	141
6.2 PUBLICACIÓN REALIZADA EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO .....	142
BIBLIOGRAFÍA .....	143
ANEXO 1 : ESQUEMA GENERAL DE CONEXIONES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
ANEXO 2 : PANEL DE CONTROL MANUAL .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
A2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
A2.2 ESQUEMA DE CONEXIONES DEL PANEL DE CONTROL MANUAL.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
PLIEGO DE CONDICIONES.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
PRESUPUESTO .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema propuesto por la IEC 62108 en relación a pruebas con ciclado térmico.....	3
Figura 1.2 Diagrama de tiempos para el ciclo de tipo 1 .....	5
Figura 1.3 Diagrama de tiempos para el ciclo de tipo 2 .....	6
Figura 2.1 Estructura de una célula de silicio convencional .....	11
Figura 2.2 Modelo eléctrico teórico de la célula solar .....	12
Figura 2.3 Circuito equivalente de una célula solar.....	12
Figura 2.4 Característica I-V de iluminación .....	13
Figura 2.5 Ilustración de los efectos de las resistencias serie y paralelo sobre la característica de iluminación de una célula solar .....	15
Figura 2.6 Ejemplo de una curva característica de una célula solar en condiciones de oscuridad .....	17
Figura 2.7 Curvas IV en oscuridad a 15°C, 25°C, 35°C y 45°C .....	18
Figura 2.8 Curva IV en oscuridad a 25 °C y 27 °C.....	18
Figura 3.1 Esquema general de la máquina LYSS .....	21
Figura 3.2 Espectro de una fuente de arco corto de xenón. ....	22
Figura 3.3 Muestra la imagen de una lámpara de arco de xenón donde se pueden observar los dos electrodos, ánodo y cátodo, enfrentados y separados a una distancia específica. ....	23
Figura 3.4 Muestra como un punto de luz en el foco del reflector parabólico crea un haz de luz colimada de aproximadamente el diámetro del reflector.....	23
Figura 3.5 Fotografía del modelo de lámpara CL1000DF .....	24
Figura 3.6 Izquierda: Fotografía de la lámpara de arco corto de xenón acoplada al disipador y a la carcasa (disipador aleteado más cubierta de plástico). Derecha: Fotografía de la fuente de alimentación de la lámpara .....	25
Figura 3.7 Esquema de potencias de entrada y salida de la lámpara de arco de xenón .....	25
Figura 3.8 Superior: fotografía del disipador de calor proporcionado por el fabricante acoplado a la lámpara. Inferior: representación de las aletas y sus variables para el cálculo de área mojada .....	26
Figura 3.9 Curva característica resultante de ventiladores acoplados en serie .....	29
Figura 3.10 Ventilador modelo G2E108-AA01-50 adquirido .....	29
Figura 3.11 Cono acoplado a la lámpara acabado en un ventilador de prueba para poder medir la presión que ejerce el conjunto lámpara-cubierta de plástico-disipador .....	30
Figura 3.12 Esquema de medición de la presión. La diferencia h determinará la presión ejercida. ....	31
Figura 3.13 Ventilador centrífugo acoplado a la lámpara de arco de xenón .....	32

Figura 3.14. Ventilador centrífugo al que se le ha acoplado un tubo extractor, además de un bimetal de protección acoplado a la lámpara. ....	33
Figura 3.15 Variación de la temperatura en la carcasa de la lámpara, medida con un termopar tipo K a una potencia de lámpara 800 W. ....	34
Figura 3.16 Esquema de posicionamiento de los elementos para calcular la extensión angular de la lámpara .....	35
Figura 3.17 Captura que muestra la distribución de luz con la cámara en tres posiciones diferentes .....	35
Figura 3.18 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: perfil por coronas. Ambas para la posición central.	36
Figura 3.19 Muestra el funcionamiento de un espejo parabólico fuera del eje (off-axis mirror) que refleja y concentra el haz colimado hacia el foco de la parábola original del que procede. De esta manera se puede elegir un cierto ángulo de reflexión con respecto al eje central del espejo.....	38
Figura 3.20 Espejo fuera del eje de 90° adquirido del fabricante EDMUND OPTICS acoplado al plato diseñado por el fabricante .....	39
Figura 3.21 Esquema que representa cómo calcular el tamaño aproximado del spot teniendo una extensión angular de 4°.....	40
Figura 3.22 Representación de la dispersión de la luz (scattering) que puede producirse por un rayo de luz cuando éste incide en una superficie ligeramente rugosa .....	41
Figura 3.23 Escenario de simulación creado en LightTools con la disposición original de los elementos ópticos. ....	42
Figura 3.24 Simulación del spot creado por el espejo fuera del eje en la posición original.....	43
Figura 3.25 Escenario de simulación para $\alpha = 15^\circ$ , giro alrededor del eje X. ....	43
Figura 3.26 Spots creados para $\alpha = 15^\circ$ (izquierda) y para $\alpha = -15^\circ$ (derecha). ....	44
Figura 3.27 Escenario de simulación para $\beta = 15^\circ$ , giro alrededor del eje Y. ....	44
Figura 3.28 Spots creados para $\beta = 15^\circ$ (izquierda) y para $\beta = -15^\circ$ (derecha). ....	45
Figura 3.29 Escenario de simulación para $\gamma = 15^\circ$ , giro alrededor del eje Z. ....	45
Figura 3.30 Spots creados para $\gamma = 15^\circ$ (izquierda) y para $\gamma = -15^\circ$ (derecha). ....	46
Figura 3.31 Muestra el ángulo de giro que tiene que realizar el espejo para conseguir que la distancia entre muestras sea de 10 cm. ....	47
Figura 3.32 Muestra la disposición de los diferentes elementos y variables a tratar. $x_1$ se corresponde con la mitad de la longitud del brazo del actuador lineal y $l_{varilla}$ es la longitud de la varilla a calcular. ....	48
Figura 3.33 Estructura de giro del espejo fuera del eje.....	49
Figura 3.34 Montaje realizado para medir el tamaño del spot .....	50
Figura 3.35 Izquierda: muestra la imagen de referencia que es utilizada para calcular las constantes. Derecha: captura del spot que se crea a la distancia óptima.....	50

Figura 3.36 Gráfica de la energía acumulada para una distancia del centro del espejo al foco de 177.8 mm .....	51
Figura 3.37 Representación de medida de una corona en el perfil por coronas para la medida del tamaño del spot creado por el espejo fuera del eje .....	51
Figura 3.38 Perfil por coronas para una distancia del centro del espejo al foco de 177.8 mm. ....	52
Figura 3.39 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: Perfil por coronas. Ambas para una distancia del centro del espejo al foco de 192.8 mm. ....	52
Figura 3.40 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: Perfil por coronas. Ambas para una distancia del centro del espejo al foco de 162.8 mm. ....	53
Figura 3.41 Muestra los ángulos de llegada de los rayos a la célula situada a 90° con respecto al centro del espejo. ....	54
Figura 3.42 Representa los ángulos con los que llegarán los rayos de luz a la célula inclinando el espejo y la lámpara 2.5° .....	55
Figura 3.43 Esquema de simulación. En realidad el SOE no está inclinado 2.5°, sino que, como ya se conoce, es toda la estructura de la lámpara y espejo la que se inclina.....	56
Figura 3.44 Distribución de intensidad angular para diferentes tamaños de cátodo, receptores y posición del cilindro. ....	56
Figura 3.45 Gráfica que muestra el porcentaje de la luz de la lámpara que llega a la salida del SOE con respecto al radio de entrada del propio SOE .....	57
Figura 3.46 Fotografía del secundario asociado al tipo de célula para las pruebas experimentales .....	58
Figura 3.47 Circuito que muestra el efecto Peltier.....	59
Figura 3.48 Representación de un módulo Peltier. ....	59
Figura 3.49 Fotografía de la placa enfriadora CP-200HT-TT junto a su fuente de alimentación y controlador.....	60
Figura 3.50 Gráfica de rendimiento de la placa enfriadora.....	61
Figura 3.51 Recorrido de la transferencia de calor desde los módulos Peltier hasta la lámina nueva a acoplar.....	61
Figura 3.52 Fotografía de la lámina acoplada a la que viene de fabrica en la placa enfriadora.....	62
Figura 3.53 Chasis NI cDAQ-9174 .....	64
Figura 3.54 Esquema de terminales y conexiones del NI 9211 .....	64
Figura 3.55 Circuito de entrada del NI 9211.....	65
Figura 3.56 Esquema de terminales y conexiones del NI 9215 .....	65
Figura 3.57 Esquema de terminales del módulo NI 9375.....	66



Figura 3.58 Izquierda: esquema de conexiones de entradas digitales. Derecha: esquema de conexiones de salidas digitales.....	66
Figura 3.59 Esquema de terminales del módulo NI 9263.....	67
Figura 3.60 Esquema de conexiones para conectar una carga a un canal del módulo NI 9263.....	67
Figura 3.61 Actuador lineal adquirido junto con el controlador compatible. ....	68
Figura 3.62 Circuito de medida de las curvas IV en oscuridad de cada célula .....	72
Figura 3.63 Circuito de medida de la corriente para cada uno de los canales de medida (circuito adaptador).....	72
Figura 3.64 Fuente de alimentación de la lámpara de arco de xenón .....	74
Figura 3.65 Gráfica de potencia de salida contra Iprog.....	75
Figura 3.66 Gráfica de tensión de salida de la fuente contra Iprog.....	76
Figura 3.67 Representación del diseño externo de la estructura de soporte de la máquina LYSS .....	77
Figura 3.68 Fotografía del aspecto externo real de la máquina LYSS.....	77
Figura 3.69 Interior de la máquina LYSS.....	78
Figura 3.70 Interior de la caja de control y adquisición de datos.....	79
Figura 3.71 Fotografía que muestra donde se encuentra instalado el bimetalo de protección .....	79
Figura 3.72 Detector de humo y ventiladores asociados a cada célula.....	80
Figura 4.1 DAQmx Create Channel (AI-Voltage Basic).....	83
Figura 4.2 DAQmx Start Task.....	84
Figura 4.3 DAQmx Read (Analog DBL 1Chan 1Samp) .....	84
Figura 4.4 DAQmx Write (Analog DBL 1Chan 1Samp) .....	84
Figura 4.5 DAQmx Clear Task .....	84
Figura 4.6 MPUSBOpen .....	85
Figura 4.7 writeVelocityFirgelli .....	85
Figura 4.8 writeAccuracyFirgelli .....	85
Figura 4.9 writePositionFirgelli .....	85
Figura 4.10 readPositionFirgelli .....	85
Figura 4.11 Serial Port Config .....	86
Figura 4.12 RS-232 Communitation.....	86
Figura 4.13 Panel frontal de Main (VI principal).....	87

Figura 4.14 Menú Cycling Parameters.....	89
Figura 4.15 Menú Dark IV curve .....	90
Figura 4.16 Menú Plate Cycling. Temperatura captada por el termistor de referencia de la placa enfriadora.....	91
Figura 4.17 Menú Monitoring - Temperature individual graphs. Temperatura de la lámpara (Lamp), de la placa enfriadora (Plate) y de las células 1 (Cell 1) y 2 (Cell 2) captadas por los termopares conectados al módulo NI 9211.....	92
Figura 4.18 Menú Monitoring - Temperature aggregated graphs. Todas las señales de temperatura procedente de los termopares del módulo NI 9211 pintadas en una misma gráfica .....	93
Figura 4.19 Menú Monitoring - $V_{OC}$ & $I_{SC}$ . Tensión de circuito abierto (parte superior) y corriente de cortocircuito (parte inferior) de las células 1 y 2.....	94
Figura 4.20 Bucle while que contiene una estructura de eventos (event structure) .....	94
Figura 4.21. Esquema de la adquisición de datos de temperatura procedente de los 4 termopares conectados al módulo NI 9211.....	95
Figura 4.22 Esquema de las funciones de LabVIEW utilizadas para escribir la Iprog (V) consigna en el canal AO2. ....	96
Figura 4.23 Esquema de las funciones de LabVIEW utilizadas para medir el estado de la lámpara .....	96
Figura 4.24 Esquema de funciones utilizadas para leer la posición actual del actuador lineal.....	97
Figura 4.25 Esquema de las funciones utilizadas para representar la temperatura de la placa enfriadora .....	97
Figura 4.26 Panel frontal del subVI Configuration.....	98
Figura 4.27 Superior: Esquema de tiempos del ciclo 1. Inferior: Menú Cycle 1.....	100
Figura 4.28 Superior: Esquema de tiempos del ciclo 2 . Inferior: Menú Cycle 2 (Izquierda: Temperatures; Derecha: Time). ....	101
Figura 4.29 Menú Log.....	102
Figura 4.30 Captura parcial del archivo Excel que almacena los valores de curva IV en oscuridad de ambas células. ....	103
Figura 4.31 Captura parcial del archivo Excel que almacena los eventos que se producen en tiempo real dentro de la ejecución de un determinado ciclo.....	104
Figura 4.32 Captura parcial del archivo Excel para almacenar las temperaturas de cada termopar .....	104
Figura 4.33 Captura parcial del archivo Excel destinado a almacenar la posición del actuador lineal una vez que comienza el ciclado de luz.....	105
Figura 4.34 Captura parcial del archivo Excel destinado a almacenar las tensiones en circuito abierto de cada célula.....	105
Figura 4.35 Menú Channels.....	106

Figura 4.36 Menú Time Limit.....	106
Figura 4.37 Menú Adjusting .....	107
Figura 4.38 Ventana de error en el actuador lineal.....	108
Figura 4.39 Menú Cold Plate temperature monitoring.....	109
Figura 4.40 Esquema de las funciones utilizadas para medir $V_{OC}$ e $I_{SC}$ de cada célula. ....	110
Figura 4.41 Esquema de las funciones necesarias para enviar la orden de temperatura consigna a la placa .....	110
Figura 4.42 Esquema de funciones que se utilizan para abrir y cerrar relés .....	111
Figura 4.43 Esquema de funciones utilizadas para enviar la posición deseada al actuador lineal.....	111
Figura 4.44 Esquema de funcionamiento del evento Start Selected Cycle .....	112
Figura 4.45 Esquema simplificado de la máquina de estados del evento Start Selected Cycle .....	112
Figura 4.47 Esquema de utilización del Express VI denominado = to within Tolerance .....	113
Figura 4.48 Esquema de medida de un punto en la curva IV en condiciones de oscuridad.....	114
Figura 4.49 Esquema simplificado del proceso de polarización de la célula .....	115
Figura 4.50 VI Linear Fit.....	116
Figura 4.51 Gráfica que muestra la temperatura en cada célula en el momento en el que se realiza la medida.....	116
Figura 4.52 Esquema de estados de la implementación del Ciclo 1.....	117
Figura 4.53 Esquema del proceso de movimiento del actuador a la posición de la célula 1 .....	118
Figura 4.54 Elapsed Time.....	118
Figura 4.55 Representación de las medidas realizadas en un ciclo de luz .....	119
Figura 4.56 Esquema de la máquina de estados para la realización del ciclo de tipo 2 .....	120
Figura 5.1 Receptor de las células a degradar por la máquina LYSS.....	127
Figura 5.2 Montaje de las células junto al secundario diseñado en la placa enfriadora .....	128
Figura 5.3 Gráfica que representa la insolación directa normal de un día nublado en Madrid en un sistema CPV .....	129
Figura 5.4 Gráfica de estabilización de la $V_{OC}$ .....	130
Figura 5.5 Gráfica de estabilización de la $V_{OC}$ aumentada .....	130
Figura 5.6 Izquierda: circuito térmico equivalente. Derecha: evolución de la temperatura durante el ciclado de luz en la parte superior del sustrato .....	131
Figura 5.7 Representación de la colocación del termopar de medida en cada una las células a testear	131

Figura 5.8 Esquema de colocación del termopar asociado a la placa enfriadora .....	132
Figura 5.9 Fotografía que muestra la disposición empleada del termopar asociado a la carcasa de la lámpara y del bimetal de protección.....	132
Figura 5.10 Curva IV de la célula 1 en iluminación inicial para una concentración de 800X.....	134
Figura 5.11 Curva IV en oscuridad inicial de la célula 1.....	134
Figura 5.12 Curva IV de la célula 2 en iluminación inicial para una concentración de 800X.....	135
Figura 5.13 Curva IV en oscuridad inicial de la célula 2.....	136
Figura 5.14 Evolución de la resistencia serie de la célula 1 en relación con el número de ciclos de luz realizados .....	136
Figura 5.15 Evolución de la resistencia serie de la célula 2 en relación con el número de ciclos de luz realizados .....	137

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Longitud de la varilla con respecto a la longitud del brazo del actuador lineal.....	48
Tabla 3.2. Variación de la potencia de salida de la fuente de alimentación con respecto a la variable $I_{prog}$ .....	75
Tabla 4.1 Coeficientes utilizados para las distintas rampas de subida de temperatura con $T_{min}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{max}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....	121
Tabla 4.2 Coeficientes utilizados para las distintas rampas de bajada de temperatura .....	122
Tabla 5.1 Número de caídas de irradiancia en Madrid causadas por nubes.....	129

## GLOSARIO

### C

**CPV** : *Concentrated PhotoVoltaic*

### I

**IEC** : *International Electrotechnical Commission*

### L

**LYSS** : *Light cYcling Stress Source*

### P

**PC** : *Personal Computer*

**PID** : *Proporcional Integral Derivativo*

### S

**SOE** : *Secondary Optical Element*

### U

**USB** : *Universal Serial Bus*

### V

**VI** : *Virtual Instrument*



# CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN





## 1.1 ESTADO DEL ARTE

El ciclo térmico natural de la célula y receptores en módulos CPV (*Concentrated PhotoVoltaic*) ha sido considerado un posible punto débil en la operación de campo real. De la misma manera, existe la sospecha de que el estrés termo-mecánico inducido por cargas repentinas de luz directa a altos niveles de irradiancia seguidas de caídas de nivel, causadas comúnmente por nubes, podría ser motivo de fallo.

Esta serie de problemas han sido tomados en cuenta por la primera normativa IEC 62108 "Design qualification and type approval" de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés), que pretende crear una norma de calificación y homologación de módulos CPV. En ella se pueden encontrar numerosos tipos de pruebas de estrés de humedad, eléctricas, etc.

Uno de los test implementados en este documento es el denominado "*Thermal cycling test*", el cual se basa en inyectar pulsos de corriente, con una intensidad determinada, una vez que la base de la célula alcanza una temperatura de 25°C, mientras dicha temperatura sigue una pendiente de variación constante desde una temperatura mínima a otra máxima. Después se mantiene un cierto tiempo en la temperatura máxima para después volver a caer hasta la mínima con una pendiente similar.

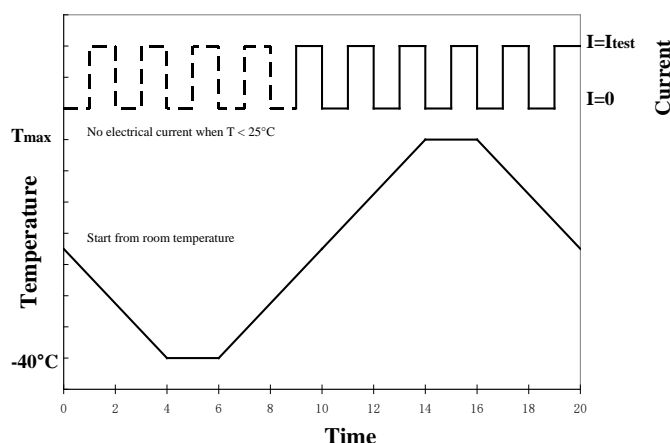


Figura 1.1 Esquema propuesto por la IEC 62108 en relación a pruebas con ciclado térmico.

Sin embargo la implementación de un tipo prueba acelerada con ciclado térmico para este tipo de receptores no ha sido implementado con luz concentrada real en las células, cuando el módulo está dentro de la cámara de ciclado térmico.

El efecto térmico de la variación de la irradiancia se simula en la norma IEC 62108 por polarización directa de células, como ha podido observarse en la anterior figura. Sin embargo, este método no llega a convencer a los fabricantes de células y está actualmente limitado a 1,25 veces la intensidad de corriente nominal. El nivel de estrés es menor que el 50% del estrés real en condiciones nominales, lo que está aún más lejos de cualquier condición de prueba acelerada.

## 1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo del proyecto es el diseño, construcción y puesta a punto de una máquina, denominada máquina LYSS (*Light cYcling Stress Source*) a partir de ahora, que pretende, entre otras cosas, realizar dos tipos de test basados en el ciclo térmico-luminoso que se ha descrito anteriormente, citado en la

normativa IEC 62108 y denominado "*Thermal cycling test*", cambiando la polarización directa de las células por luz directa concentrada a muy alta irradiancia (del orden de los 1000 soles).

Los pasos clave que se desean realizar son los siguientes:

- Diseño de la estructura de la máquina
- Búsqueda y adquisición de los diferentes dispositivos que se van a emplear para su construcción
- Diseño e implementación del software de control y monitorización, así como el montaje de los dispositivos
- Pruebas de funcionamiento del sistema con receptores CPV reales y análisis de resultados

El funcionamiento de la máquina LYSS se basa en proyectar el haz de luz colimado proveniente de una lámpara capaz de emitir con una alta irradiancia a un espejo fuera del eje (*off-axis mirror*) que es el encargado de concentrar todos los rayos de luz que le llegan en un punto, que será la parte activa de la célula. Si no se consiguiera la concentración deseada en la célula, sería necesario fabricar algún tipo de elemento óptico secundario (*SOE, Secondary Optical Element*) adaptado al tipo de célula a testear.

Con el fin de testear dos células simultáneamente, el haz se va a mover de una célula a otra para que cuando una de ellas está en iluminación, la otra está en oscuridad (simulando el paso de una nube que oculta la luz del sol). Para ello será necesario diseñar una estructura que permita mover el espejo fuera del eje empleado de manera que se produzca el efecto deseado. Esta parte se llevará a cabo con la ayuda de un actuador lineal.

Para poder llevar a cabo el ciclado térmico de ambas células será necesario utilizar algún tipo de placa enfriadora/calentadora, comandada por un ordenador, que sea capaz de mantener una temperatura específica de base de la célula en todo momento.

Teniendo por objetivo medir la degradación que producirán estos tipos de test en la célula se va a medir la curva característica de la célula en oscuridad, es decir, la curva IV en condiciones de oscuridad. Antes y después de cada ciclo se deberá de almacenar dicha curva para poder realizar una comparativa entre los parámetros característicos de cada una y así observar la degradación que se haya producido.

En conclusión, el objetivo principal de la máquina LYSS es el de acelerar el proceso de degradación en la célula de manera que en tan solo 2 meses se produzca la misma degradación que en 30 años de vida útil.

### 1.2.1 TIPOS DE CICLO A IMPLEMENTAR

#### Ciclo 1

El primer tipo de ciclo a implementar cumple el siguiente diagrama:

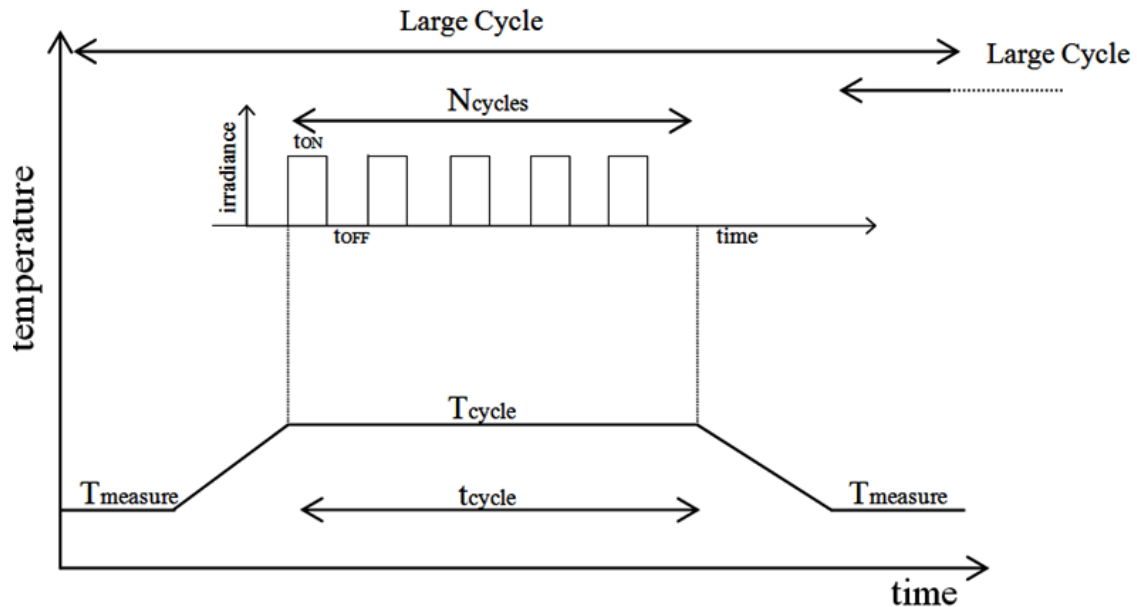


Figura 1.2 Diagrama de tiempos para el ciclo de tipo 1

Este tipo de ciclo realiza el ciclado de luz a una temperatura constante (ciclo térmico-luminoso) de base de célula. En particular realiza los siguientes pasos:

1. Medida de la curva IV en condiciones de oscuridad de las células a una temperatura de medida ( $T_{measure}$ ) específica.
2. Cuando se alcanza la temperatura fija de ciclo ( $T_{cycle}$ ) se procede a realizar el ciclo térmico-luminoso con un ciclo de trabajo de pulsos de luz determinado por las constantes de tiempo  $t_{ON}$  y  $t_{OFF}$ . Hay que tener en cuenta que cuando una célula se encuentra iluminada la otra se encuentra sombreada.
3. Cuando se realizan todos los ciclos de luz ( $N_{cycles}$ ) se procede a realizar la medida de la curva IV en oscuridad de nuevo a la temperatura de medida.

Un ciclo largo (*Large Cycle*) se compone de una primera medida de curva IV en oscuridad, más el correspondiente ciclo térmico-luminoso, para finalmente acabar con otra medida de curva IV en oscuridad. Hay que tener en cuenta que la segunda medida de curva IV de un determinado ciclo largo equivaldría a la primera medida del siguiente ciclo largo a llevar a cabo.

## Ciclo 2

El diagrama de tiempos del segundo tipo de ciclo es similar al diagrama proporcionado en la normativa IEC 62108:

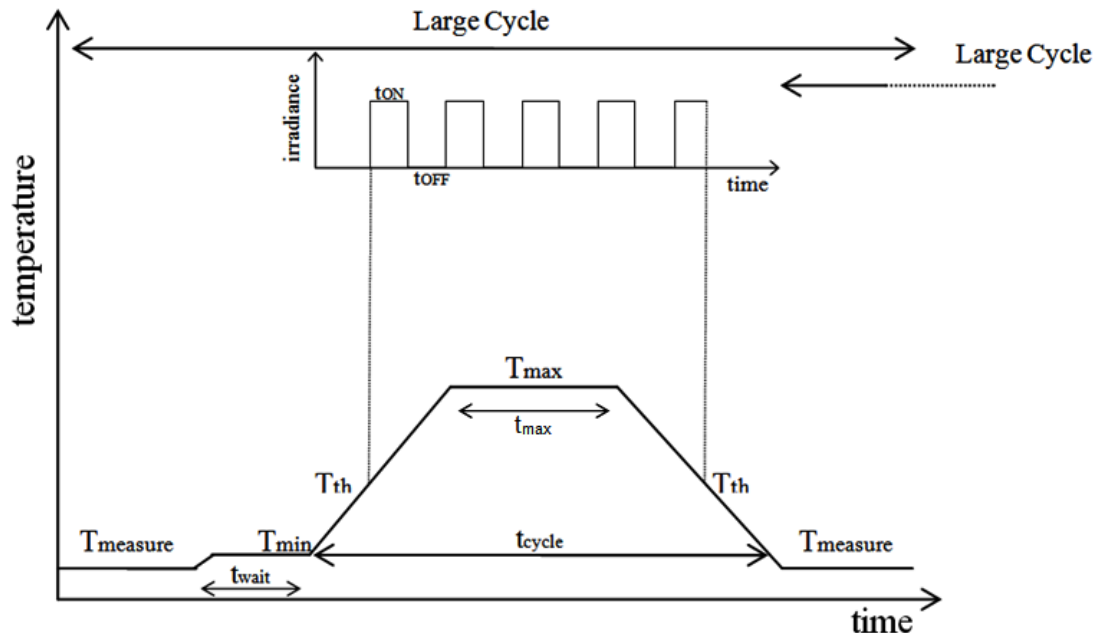


Figura 1.3 Diagrama de tiempos para el ciclo de tipo 2

En este tipo de ciclo la temperatura de la base de la célula varía desde una temperatura mínima ( $T_{min}$ ) hasta una temperatura máxima ( $T_{max}$ ) con una determinada pendiente de subida y bajada (ciclo térmico).

De manera similar al ciclo proporcionado en la normativa, cuando la temperatura de la base de la célula es menor que una determinada temperatura umbral ( $T_{th}$ ) no se realiza el ciclado de luz.

En resumidas cuentas, los pasos que se realizan en este tipo de ciclo son los siguientes:

1. Medida de la curva IV en oscuridad a la temperatura de medida ( $T_{measure}$ )
2. Cuando se alcanza la temperatura mínima especificada ( $T_{min}$ ) en la base de la célula se espera un tiempo determinado ( $t_{wait}$ ) a esa temperatura.
3. Rampa de subida de temperatura desde  $T_{min}$  hasta  $T_{max}$  con una determinada pendiente, es decir, comienza el ciclo térmico y cuando se alcanza la temperatura umbral ( $T_{th}$ ) comienza el ciclado de luz.
4. Cuando se alcanza la temperatura máxima ésta se mantiene un tiempo especificado por el usuario ( $t_{max}$ )
5. Rampa de bajada de temperatura desde  $T_{max}$  hasta  $T_{min}$  con una determinada pendiente. Cuando se alcanza la temperatura umbral ( $T_{th}$ ) se detiene el ciclado de luz.
6. Cuando se alcanza de nuevo la temperatura mínima termina el ciclo térmico y se procede a realizar una nueva medida de curva IV en oscuridad a la temperatura de medida ( $T_{measure}$ ).

Con la realización de estos dos tipos de ciclos basados en la normativa IEC 62108, el objetivo de la máquina LYSS es producir la misma degradación que pueda sufrir una célula al cabo de 10 años en tan

sólo unas semanas de test continuo. Es sin duda, un método rápido y eficaz de medir la vida útil de cualquier tipo de célula.

### 1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria se compone de 6 capítulos que se describen a continuación:

El primer capítulo no es más que una primera introducción del proyecto. Se explica qué es lo que se desea implementar con este proyecto, cómo se desea implementar y los motivos por los cuales se decidió abarcarlo, así como la metodología de trabajo a seguir para la consecución del mismo.

En el segundo capítulo se exponen los conceptos básicos de caracterización de células solares, como la curva IV tanto en iluminación como en oscuridad y los diferentes parámetros que se pueden obtener de las mismas, así como definir el criterio de fallo de las pruebas de estrés termo-mecánico a realizar por la máquina.

El tercer capítulo se dedica plenamente a explicar el diseño estructural y funcional de la máquina, así como la realización de medidas experimentales de diferentes parámetros de los dispositivos que la componen.

En primer lugar, se exponen los componentes que son necesarios para la construcción de la máquina y se resumen las características principales de los que finalmente se han adquirido. Además, se realizan medidas experimentales de algunas características de varios de ellos para comprobar, entre otras cosas, su eficiencia de funcionamiento y su efecto en los demás dispositivos de la máquina.

El cuarto capítulo corresponde al desarrollo software de la aplicación. En este capítulo se explica la programación de la aplicación implementada en *LabVIEW* asociada a la máquina. Se presenta mediante diagramas de flujo, imágenes de la aplicación, sencillas explicaciones y justificaciones. Proporciona una idea clara y concisa de las diferentes funciones programadas en cada bloque funcional.

El fin de este capítulo es introducir al usuario en el funcionamiento interno del programa. De este modo, será capaz de utilizar todas las herramientas proporcionadas por la aplicación para la configuración y realización de un determinado ciclo largo. Además, mediante este capítulo, el usuario es capaz de conocer a fondo la estructura del programa, con lo que se facilita la tarea de incluir en un futuro nuevas funcionalidades a la aplicación.

En el quinto capítulo se presentan los resultados obtenidos al realizar una serie de ciclos luminosos a temperatura constante (Ciclo 1) a dos receptores solares CPV comerciales. En él se explica con detalle tanto el montaje como la configuración que se ha llevado a cabo, así como las conclusiones que se pueden recoger de estas pruebas.

El sexto capítulo recoge las principales conclusiones del proyecto realizado así como el posible trabajo futuro a realizar. Además, incluye la referencia del artículo de congreso publicado en el marco de este proyecto.



# CAPÍTULO 2 :

## FUNDAMENTOS DE CÉLULAS SOLARES Y CRITERIO DE FALLO





## 2.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha indicado con anterioridad, la característica con la que se va a medir la degradación de las células a testear es la curva IV en oscuridad.

Para poder entender la utilidad práctica de la medida de esta curva es necesario explicar conceptos básicos de caracterización de células solares, como la curva IV tanto en iluminación como en oscuridad y los diferentes parámetros que se pueden obtener de las mismas, así como definir el criterio de fallo de las pruebas de estrés termo-mecánico a realizar por la máquina.

## 2.2 LA CÉLULA SOLAR

Cuando la luz del Sol incide sobre ciertos materiales llamados semiconductores, los fotones que la constituyen son capaces de transmitir su energía a los electrones de valencia del semiconductor para que rompan el enlace que les mantiene ligados a los átomos respectivos. Por cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido. La falta de electrón en el enlace roto, llamado hueco, también puede desplazarse libremente por el interior del sólido, transfiriéndose de un átomo a otro debido al desplazamiento del resto de los electrones de los enlaces. Los huecos se comportan, en muchos aspectos como partículas con carga positiva igual a la del electrón.

El movimiento de los electrones y huecos en direcciones opuestas genera una corriente eléctrica en el semiconductor capaz de circular por el circuito externo, y liberar en él energía de la cedida por los fotones al crear los pares electrón-hueco. Para separar los electrones de los huecos, e impedir que restablezcan el enlace, se utiliza un campo eléctrico (o la correspondiente diferencia de potencial), que hace que ambos circulen en direcciones opuestas, dando lugar a una corriente en el sentido del citado campo eléctrico.

## 2.3 ESTRUCTURA DE LAS CÉLULAS SOLARES

En las células solares convencionales este campo eléctrico se consigue en la unión de dos regiones de un cristal semiconductor, de conductividades de distinto tipo.

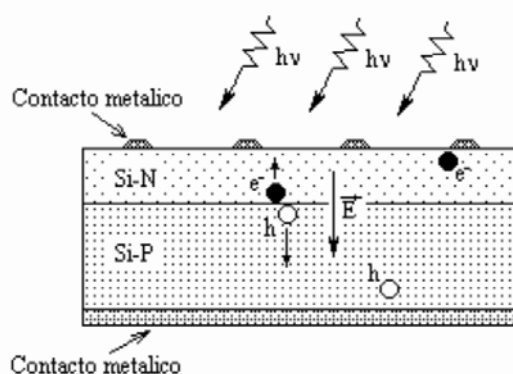


Figura 2.1 Estructura de una célula de silicio convencional

En el caso de que el material semiconductor sea el silicio, la región llamada de tipo *n*, se impurifica con fósforo, que es una región con concentración de electrones mucho mayor que la de huecos. La otra, llamada tipo *p*, se impurifica con boro, y es una región con una concentración de huecos mayor que la de electrones. Estas grandes diferencias entre huecos y electrones de las distintas regiones crean, para

mantenerse, un campo eléctrico dirigido de la región  $n$  a la región  $p$ , que es el responsable, también de separar los electrones y huecos extras que se producen cuando la célula está iluminada.

## 2.5 MODELO ELÉCTRICO TEÓRICO

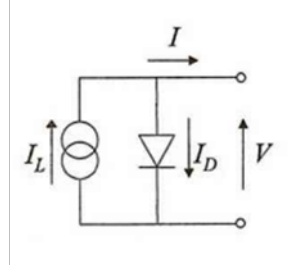


Figura 2.2 Modelo eléctrico teórico de la célula solar

En la figura anterior se muestra el modelo eléctrico teórico de este tipo de células donde la unión  $p-n$  es representada por un diodo, cuyo comportamiento eléctrico es conocido, y por una fuente de corriente dispuesta en paralelo que representa la corriente fotogenerada.

En este circuito se pueden aplicar las leyes de Kirchoff obteniendo la expresión que describe su funcionamiento:

$$I = I_L - I_D(V)$$

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qV}{mkt}} - 1 \right)$$

donde  $k$  es la constante de Boltzman ,  $T$  es la temperatura absoluta de la unión,  $A$  es el coeficiente de emisión con  $1 < m < 2$  que depende del material de fabricación y  $q$  es la carga del electrón.

Este modelo básico resulta insuficiente para representar la célula. En ella existen unas corrientes de fuga del comportamiento lineal, que atraviesan la unión. Además, existe una caída de potencial proporcional a la intensidad que circula debida a la resistencia de los contactos y cables de conexión. Es por ello que debe mejorarse el modelo anterior añadiéndole una resistencia en paralelo que denominaremos  $R_{sh}$ , que representará la resistencia de los contactos. Con todo esto el modelo queda como puede verse en la siguiente figura:

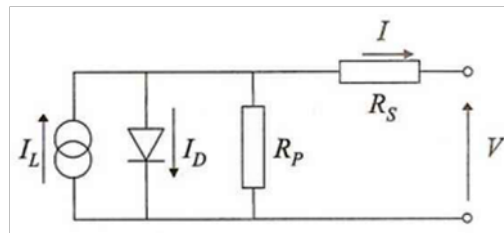


Figura 2.3 Circuito equivalente de una célula solar

En este caso, la aplicación de las leyes de Kirchoff conduce a las siguientes expresiones:

$$I = I_L - I_D(V) - I_P$$

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V+IR_S)}{mkt}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_P}$$

$R_p$  es denominada comúnmente como la resistencia paralelo y  $R_s$  como la resistencia serie de la célula.

Con todo lo anterior ya se puede caracterizar de forma adecuada la célula solar.

## 2.6 CARACTERÍSTICA I-V DE ILUMINACIÓN

De acuerdo con la primera ecuación del anterior apartado, la corriente eléctrica suministrada por una célula solar a una carga viene dada por la diferencia entre la fotocorriente  $I_L$  y la corriente de recombinación o de diodo,  $I_D(V)$ , debida a la polarización producida por el voltaje generado.

Considerando la ecuación característica del dispositivo como

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right)$$

se adopta el convenio de signos de considerar positivas las corrientes de generación, donde el primer cuadrante del plano  $I$ - $V$  corresponde al funcionamiento de la célula entregando corriente a una carga bajo tensión positiva; es decir, corresponde al funcionamiento del dispositivo como generador de energía.

### 2.6.1 PARÁMETROS DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CÉLULA

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede representar la ecuación característica  $I$ - $V$  en iluminación como la siguiente gráfica:

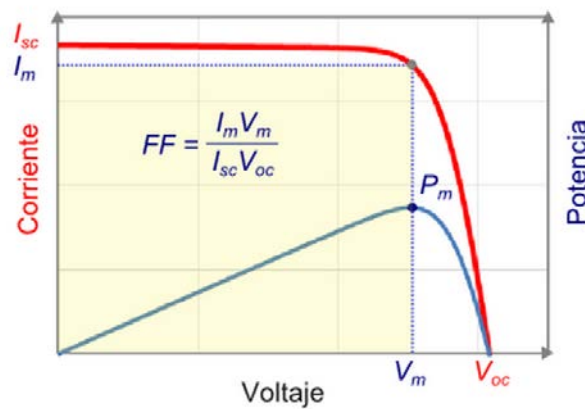


Figura 2.4 Característica  $I$ - $V$  de iluminación

#### Corriente de cortocircuito

Como puede observarse en la anterior figura, el mayor valor de corriente en la región de generación se obtiene para condiciones de cortocircuito,  $V=0$ . Según la ecuación básica de la célula la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  viene dada por:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L$$

#### Tensión de circuito abierto

Si el dispositivo se mantiene en circuito abierto,  $I=0$ , éste se autopolarizará con una cierta tensión, que es la mayor que puede soportar en la región de generación. Se trata de la tensión de circuito abierto  $V_{oc}$

y su valor es tal que la fotocorriente queda completamente compensada por la corriente de polarización. Esto es,  $I_L = I_D(V_{OC})$ , en condiciones de circuito abierto y, teniendo en cuenta la ecuación básica de caracterización de la célula, resulta:

$$V_{OC} = m \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

De esta manera la definición de los dos parámetros de operación anteriores permite escribir la característica de la célula de la siguiente manera alternativa:

$$I = I_{SC} \left[ 1 - e^{\left( -\frac{q(V_{OC}-V)}{mkT} \right)} \right]$$

La fórmula es prácticamente cierta alrededor del circuito abierto, pero su validez para todo el rango de funcionamiento es cuestionable porque los parámetros  $m$  e  $I_0$  de la ecuación básica son, en general, variables con el punto de trabajo.

### **Punto de máxima potencia**

Como ya se ha indicado con anterioridad, la región de la curva característica comprendida entre  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$  corresponde al funcionamiento de la célula como generador.

Si la energía se suministra a una carga resistiva, como se muestra en la Figura 2.4, la potencia entregada a la resistencia viene dada por el producto  $P = I V$ , y existirá un punto de funcionamiento  $(I_m, V_m)$  para el que la potencia entregada sea máxima: es el punto de máxima potencia. Los valores de  $I_m$  y  $V_m$  pueden obtenerse de la condición de máximo:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow 0 = d(IV)_m = I_m dV + V_m dI$$

que también puede escribirse como

$$\left[ \frac{dI}{dV} \right]_m = -I_m / V_m$$

que representa una condición de máximo completamente general.

### **Factor de forma**

El producto entre  $I_m$  y  $V_m$  da la potencia máxima entregada a la carga y viene representado en la Figura 2.4 por el área del rectángulo rayado, que es obviamente menor que la del rectángulo que representa el producto de  $I_{SC}$  y  $V_{OC}$ . Ambos productos se aproximan más cuanto más pronunciado sea el codo de la curva característica. Pero naturalmente en todos los casos reales el parámetro definido por el cociente

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{SC} V_{OC}}$$

es siempre menor que la unidad. Este cociente, llamado factor de forma, suele utilizarse como cuantificación de la forma de la curva característica. El factor de forma es un parámetro de gran utilidad práctica, que varía poco de unos dispositivos a otros.

Haciendo uso de estas ecuaciones, la potencia máxima entregada por la célula puede escribirse como:

$$P_m = FF I_{SC} V_{OC}$$

### Eficiencia de conversión energética

Es un parámetro muy importante que se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede generar a la carga y la potencia de la radiación incidente  $P_L$  sobre el dispositivo:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_L}$$

Naturalmente, esta eficiencia y la potencia máxima se obtienen únicamente si la resistencia de carga es la adecuada, dada por  $V_m/I_m$ .

En estos apartados se han presentado expresiones que describen el comportamiento de células solares ideales. A continuación se ilustra cómo influyen los efectos de las resistencias representadas anteriormente en la curva característica.

### Efectos de $R_s$ y $R_{sh}$

Los efectos de  $R_s$  y  $R_{sh}$  sobre el comportamiento extrínseco de la célula quedan ilustrados en la figura en la siguiente figura:

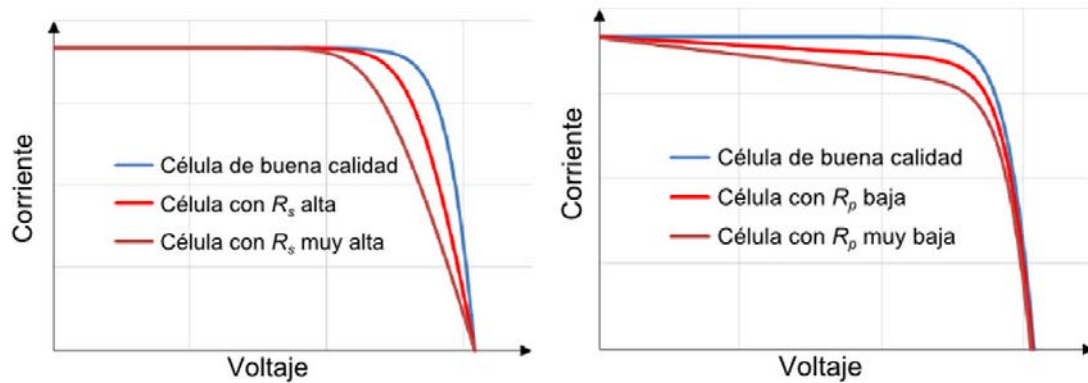


Figura 2.5 Ilustración de los efectos de las resistencias serie y paralelo sobre la característica de iluminación de una célula solar

Observando la figura anterior se puede afirmar que el efecto de la resistencia paralelo, cuando es suficientemente pequeña, es el de reducir la tensión de circuito abierto y el factor de forma, sin afectar a la corriente de cortocircuito.

Una alta resistencia serie, por contra, reduce el factor de forma y la corriente de cortocircuito, sin afectar a la tensión de circuito abierto. El efecto de esta resistencia sobre la degradación del factor de forma es muy importante ya que es determinante de un bajo rendimiento del dispositivo, sobre todo, en aquellas células que trabajan con altos niveles de corriente debido a la iluminación mediante luz concentrada por medios ópticos.

En el caso de la máquina LYSS se esperará obtener valores de  $R_s$  crecientes de forma proporcional al número de ciclos de luz inyectados a la parte activa de la célula.

Es relativamente sencillo calcular los parámetros anteriormente descritos cuando se tiene una curva característica en iluminación. Debido a que la máquina medirá esta característica en oscuridad, ya que es más sencillo hacerlo en esas condiciones, es necesario conocer cómo es posible conocer la degradación que sufren esos parámetros observando su curva de oscuridad.

## 2.6.2 CURVA CARACTERÍSTICA EN OSCURIDAD

Existen mecanismos para predecir la curva IV en iluminación a partir de la curva tomada en oscuridad, aunque en este dispositivo no será del todo necesario utilizarlos en principio, ya que simplemente se observará la variación en la resistencia serie, que previsiblemente aumentará con el número de ciclos. Para ello es necesario explicar el procedimiento de cálculo de esta resistencia.

En primer lugar, se asume que la relación  $V-I$  de una célula en condiciones de oscuridad y obviando el efecto de la resistencia paralelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{q(V-IR_s)}{mkT}} - 1 \right)$$

Diferenciando la ecuación anterior se obtiene una expresión para la resistencia serie a partir de la curva de oscuridad:

$$R_s = \frac{dV}{dI} - m \cdot \frac{kT}{q(I + I_0)} - I \frac{dR_s}{dI}$$

En general, esta ecuación diferencial se resolvería por el método de aproximaciones sucesivas, en el cual habría que realizar dos derivadas (una por cada término diferencial de la ecuación anterior) que se definen como la pendiente de la recta de regresión en un entorno determinado del punto en cuestión.

### **Criterio de fallo y estimación de resistencia serie**

En primer lugar, se debe de establecer un criterio de fallo de fiabilidad de la célula que sea viable con la ejecución continua de los ciclos de estrés, y que será dependiente del tipo de célula que se esté degradando.

Se decide basar el criterio de fallo en la variación de la resistencia serie, ya que el efecto en la curva de oscuridad de ésta es más evidente en zona de altas corrientes. Como ya se conoce, un incremento en la resistencia serie conlleva una disminución del rendimiento de la célula, es decir, de la potencia entregada por ésta que tendrá que ser debidamente estimada a partir del valor de la resistencia serie.

Por tanto, es necesario estimar el valor de la resistencia serie de la célula solar en cuestión con un método más sencillo que el explicado anteriormente, para que el proceso de observar el fallo en el dispositivo se realice de manera más rápida.

Además, es importante tener en cuenta que la resistencia serie es diferente en condiciones de iluminación que en condiciones de oscuridad, por ello siempre se calculará y se comparará en estas condiciones.

En general una curva IV en oscuridad para una célula determinada adquiere una forma similar a la que se muestra en la siguiente figura:

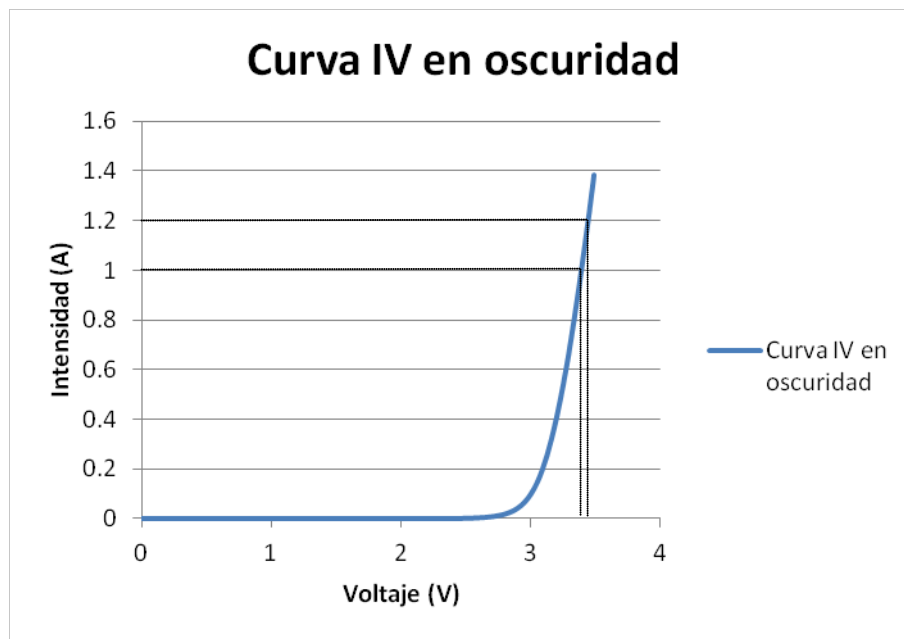


Figura 2.6 Ejemplo de una curva característica de una célula solar en condiciones de oscuridad

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se establece un método de estimación de la resistencia serie basado en calcular la pendiente de la curva en un rango de corrientes específico  $[I_{min}, I_{max}]$ , en el ejemplo  $[1, 1.2]$ , que podrá ser controlado por el usuario mediante software, ya que dependerá de las características de las células a medir.

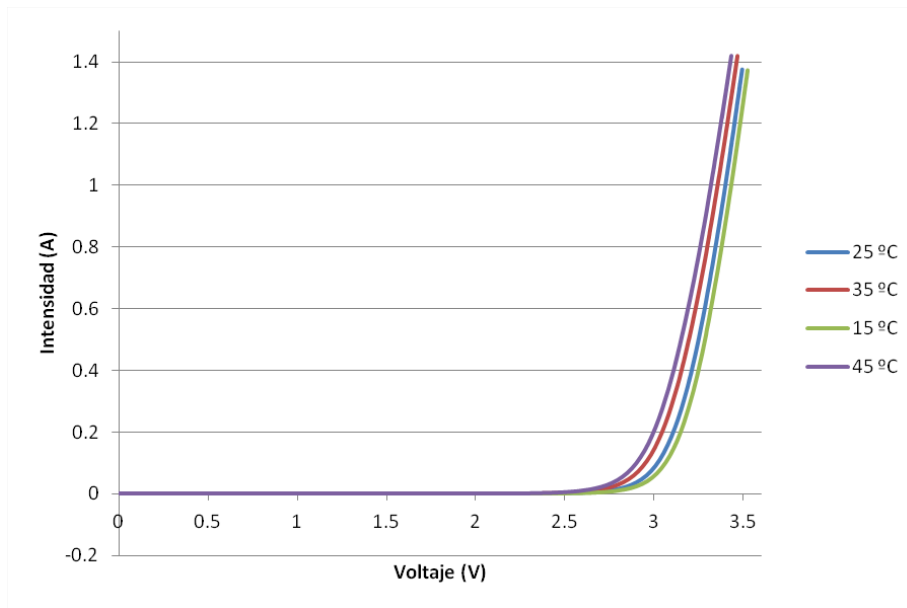
Para el cálculo de la pendiente de la curva, se establecerá la correspondencia entre los valores correspondientes de  $I$  y  $V$  que se encuentran dentro del rango de corrientes especificado por el usuario y ,entonces, se calculará la pendiente de la línea de tendencia (ajuste lineal) que pasa por esos puntos que dará lugar a la estimación de la resistencia serie, siendo ésta la inversa de dicha pendiente.

Como ya se conoce, antes y después de cada ciclo de estrés se mide la curva IV en oscuridad de cada célula. En el momento en que se observe una variación de resistencia serie que supere el umbral de fallo, se removerá la célula en cuestión de la máquina y se medirá su curva característica en iluminación que será comparada con la curva obtenida antes de realizar el proceso de degradación para poder obtener conclusiones sobre su comportamiento.

### **Temperatura de medida**

Uno de los factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de medir las curvas en oscuridad es la temperatura a la que la célula se encuentra en el momento de la medida. El aumento de la temperatura de la célula provoca que tanto la  $V_{oc}$  como el factor de forma disminuyan y hace que, en general, el rendimiento disminuya también.

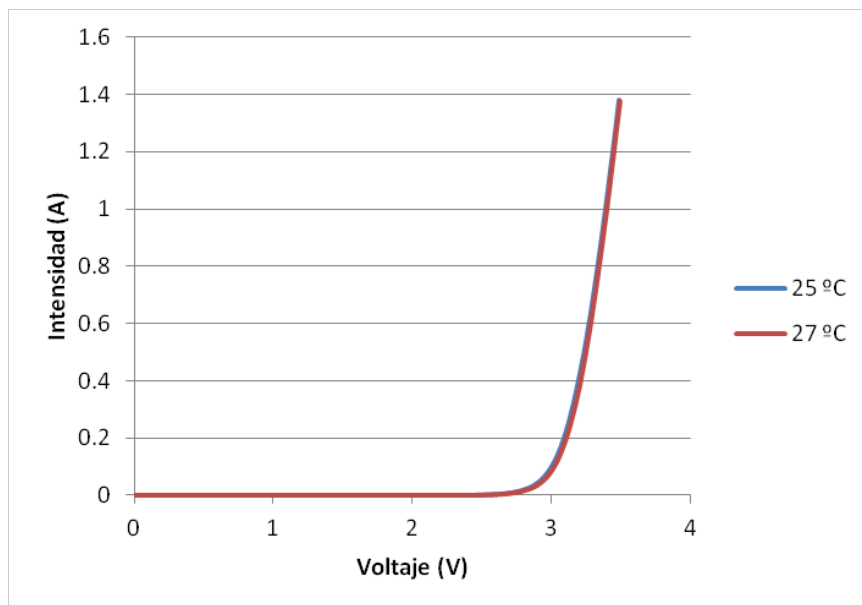
Sin embargo, también es de suma importancia tener en cuenta que para variaciones de temperatura de 2 o 3 °C estos efectos son totalmente despreciables, es decir, una curva IV en condiciones de oscuridad de una célula determinada a 25 °C es prácticamente la misma curva tomada a una temperatura de 27 °C, por ejemplo. De hecho, la diferencia entre estas temperaturas se traduce como un desplazamiento del "codo" de la curva en oscuridad, pero no modifica la pendiente de la recta de conducción de la célula, tal y como se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 2.7 Curvas IV en oscuridad a 15 °C, 25 °C, 35 °C y 45 °C*

Se observa que la pendiente en la zona de conducción es prácticamente la misma para las 4 temperaturas.

Para una diferencia de temperatura de 2 °C se obtienen las siguientes curvas:



*Figura 2.8 Curva IV en oscuridad a 25 °C y 27 °C.*

Se comprueba que las curvas son prácticamente idénticas a ambas temperaturas.

En resumen, la situación ideal se da cuando la medida de este tipo de curvas se realiza a temperatura constante, pero en la máquina LYSS siempre se tendrán dos o tres grados de variación durante todo este proceso de medida, tal y como se detallará en el capítulo 4.



# CAPÍTULO 3 : ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA



### 3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La estructura general que se ha diseñado para la máquina LYSS se muestra en la siguiente figura:

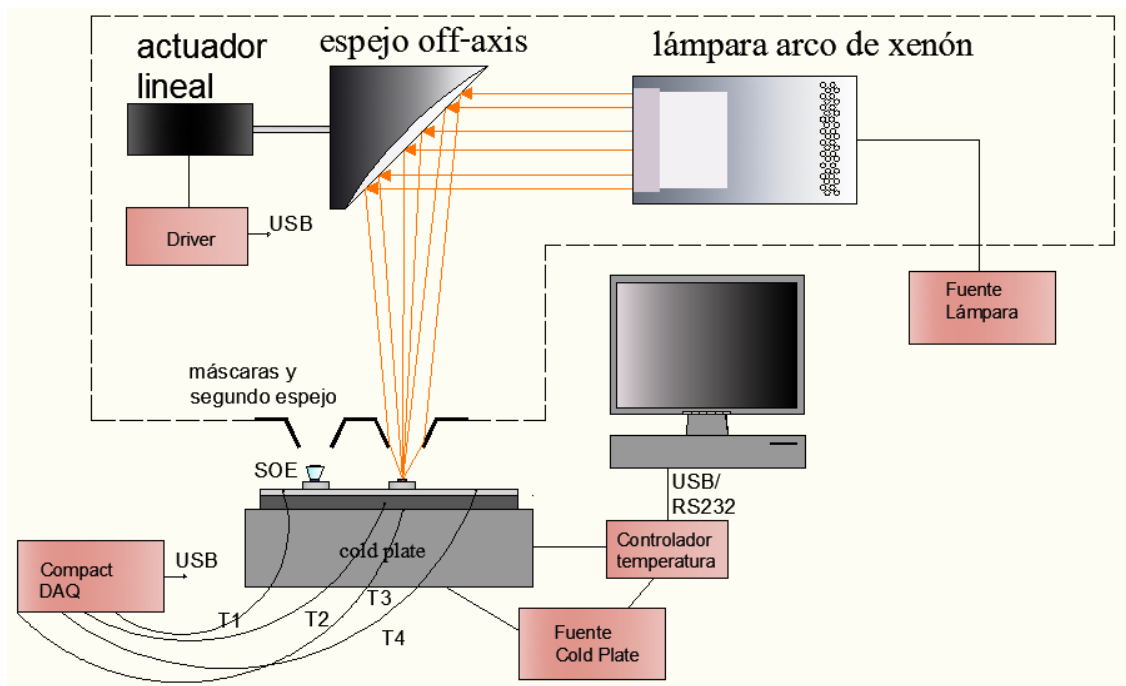


Figura 3.1 Esquema general de la máquina LYSS

La estructura de la máquina LYSS se puede descomponer en 3 módulos diferenciados:

- 1) Módulo óptico.** Como su propio nombre indica, se compone de todos los elementos ópticos que conforman el dispositivo: la lámpara de arco corto de xenón, el espejo fuera del eje (espejo *off-axis*, en el esquema), las máscaras y elementos ópticos secundarios. Estos elementos son los que se encargan de producir la luz y guiarla hasta la parte activa de la célula con la mayor eficiencia de concentración posible.
- 2) Módulo de control de temperatura.** Este módulo se compone de la placa enfriadora (*Cold Plate*), que será la encargada de llegar a y/o mantener la temperatura específica en cada instante.
- 3) Módulo de control y adquisición de datos.** Se compone de todos los elementos que adquieren y generan señales de control y adquieren datos. En concreto está formado por el *CompactDAQ* con los diferentes módulos que lo componen, el controlador del actuador lineal que se encarga del movimiento del haz, relés de selección y de apagado remoto de fuentes de alimentación y el controlador de la placa enfriadora. También está compuesto del circuito de medida de la curva IV en oscuridad de cada célula así como el ordenador de control del software utilizado.

### 3.2 MÓDULO ÓPTICO

#### 3.2.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha especificado en la descripción general este módulo consta de los siguientes elementos:

- 1) Lámpara de arco de xenón

- 2) Espejo fuera del eje (*off-axis mirror*)
- 3) Máscaras y elementos ópticos secundarios

---

### 3.2.2 LÁMPARA DE ARCO CORTO DE XENÓN

---

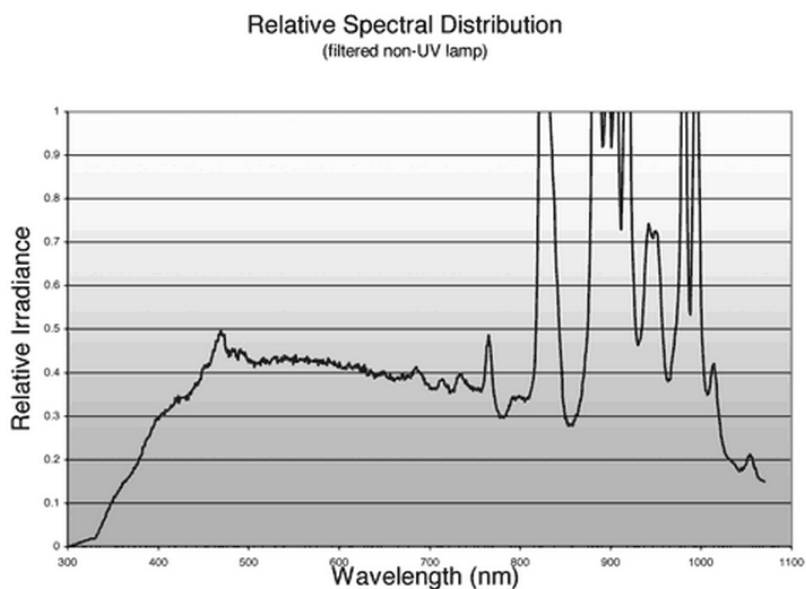
#### 3.2.2.1 DESCRIPCIÓN TEÓRICA

---

##### 3.2.2.1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Una lámpara de arco de xenón es un tipo especial de lámpara de descarga de gas en la cual al pasar electricidad a través de gas xenón ionizado a alta presión.

El tipo de lámpara de arco de xenón que se va a utilizar en la máquina LYSS produce luz de forma continua. Al contrario que para los demás tipos de gases utilizados en lámparas de descarga, la lámpara de arco de xenón produce un espectro muy largo y uniforme a través de la región espectral visible, con un espectro total similar al del sol.



*Figura 3.2 Espectro de una fuente de arco corto de xenón.*

La temperatura de color de la luz que emite es de aproximadamente 6000K, que es similar también a la temperatura de color del espectro solar.

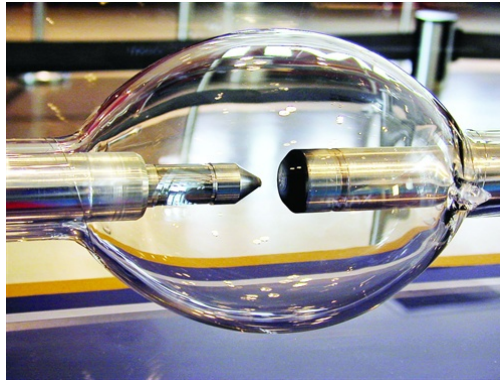
Además, este tipo de lámparas proporciona una salida con valores muy altos de irradiancia y luminancia en comparación con las demás fuentes de luz continua existentes. Sus características son similares a las de una fuente puntual de luz ideal. Suelen ser más estables y de larga vida útil en comparación con otras lámparas de descarga.

---

##### 3.2.2.1.2 GENERACIÓN DE LUZ

La generación de la luz en este tipo de lámparas es posible gracias a la producción por la fuente de alimentación de un potencial eléctrico extremadamente alto, generalmente de unos 30.000 Voltios, que pasará por dos electrodos (ánodo y cátodo) enfrentados el uno al otro a una distancia específica y

separados por gas xenón. Este potencial que pasa por los dos electrodos hace que se produzca un arco que hace posible el enfoque de la luz con una precisión aceptable, como si fuera puntual. Una vez que se produce este arco la generación de luz es continua manteniendo un potencial mucho más bajo que el que lo produce manteniéndose a baja tensión y con corriente controlada (comportamiento similar al de un tiristor).

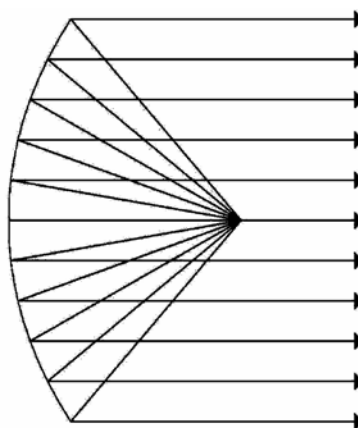


*Figura 3.3 Muestra la imagen de una lámpara de arco de xenón donde se pueden observar los dos electrodos, ánodo y cátodo, enfrentados y separados a una distancia específica.*

#### 3.2.2.1.3 REFLECTOR PARABÓLICO

---

En el esquema propuesto en la descripción general de la máquina se observa que se requiere una fuente de luz colimada. Para que esto sea posible es necesario acoplar un reflector parabólico a la lámpara. Este reflector tiene la función de reflejar los rayos provenientes del punto de luz creado por la lámpara teniendo en cuenta que el arco se debe situar en el foco de la parábola para hacer posible que el haz de rayos de salida sea colimado.



*Figura 3.4 Muestra como un punto de luz en el foco del reflector parabólico crea un haz de luz colimada de aproximadamente el diámetro del reflector.*

Tal y como se mostrará en el siguiente apartado, en la práctica este haz no será del todo paralelo lo que hará que el tamaño del spot incidente en la célula sea de mayor tamaño que el esperado.

---

### 3.2.2.2 MODELO DE LÁMPARA ESCOGIDO Y PROBLEMAS ENCONTRADOS

---

#### 3.2.2.2.1 MODELO ESCOGIDO

---

En primer lugar, se procedió a un estudio exhaustivo de los diferentes proveedores de este tipo de lámparas. El propósito era encontrar un modelo que incluyera lámpara y reflector parabólico junto con una carcasa (*housing*) compatible, fuente de alimentación y ventilador de refrigeración. Cuando se habla de la carcasa de la lámpara se refiere al conjunto de un disipador de calor (construido con aletas, en general) para refrigeración de la lámpara y una cubierta de plástico u otro material.

Además, es muy importante encontrar un tipo de lámpara que sea capaz de proporcionar la potencia que se requiere para alcanzar una densidad de potencia suficiente para realizar las pruebas.

El modelo final escogido fue *CL1000DF* fabricado por *Luxtel llc*. Es una empresa especialista en este tipo de lámparas en la cual se puede escoger entre una gran variedad de potencias máximas entre un rango de 150 W a 1000 W. Se escoge la de 1000 W eléctricos ya que proporciona una potencia de hasta 250 W luminosos en un ancho de banda de 350 a 1000 nm, aproximadamente.

El tamaño del haz de rayos procede de una ventana de 2 pulgadas, es decir, 50.2 mm.



*Figura 3.5 Fotografía del modelo de lámpara CL1000DF*

Las principales características de esta lámpara a su potencia nominal de 1000 W son:

- Salida de flujo radiante (*Radiant Output*) = 250 W
- Salida visible (*Visible Output*) = 24000 lúmenes
- Salida en el ultravioleta (*UV Output*) = 13 W
- Salida en el infrarrojo (*IR Output*) = 135 W
- Temperatura de color (*Color Temperature*) = 5050 K
- Voltaje mínimo de encendido (*Minimum Ignition Voltage*) = 32 kV

Es necesario utilizar elementos ópticos para concentrar toda esa potencia en un spot con el tamaño mínimo posible focalizando todos los rayos de luz en la parte activa de la célula. El encargado de realizar dicha función va a ser un espejo fuera del eje de 90° que se describirá más adelante.

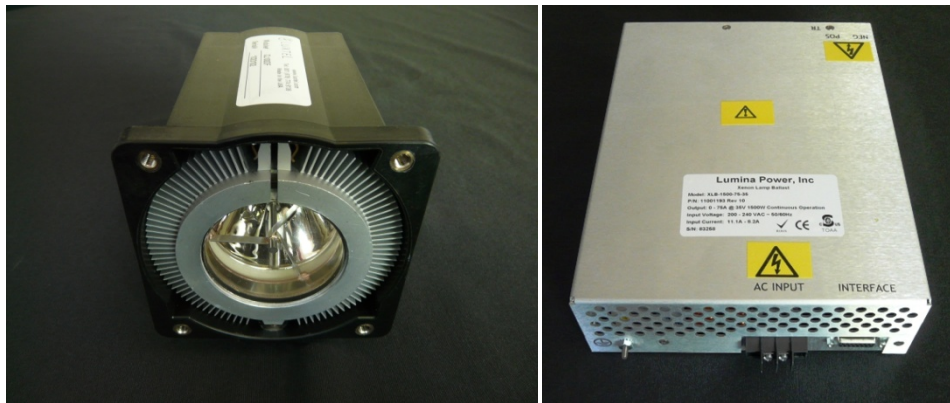
---

#### 3.2.2.2.2 PROBLEMAS ENCONTRADOS

---

El principal problema que hubo que solventar fue que el proveedor no suministraba ningún tipo de ventilador de refrigeración, simplemente ofrecía la posibilidad de adquirir la lámpara de arco de xenón y el reflector parabólico así como la fuente de alimentación y la carcasa compatible de plástico. Se debía

proceder entonces al acoplamiento de algún tipo de ventilador para poder refrigerar la lámpara de una manera correcta y sin peligro de sobrecalentamiento.



*Figura 3.6 Izquierda: Fotografía de la lámpara de arco corto de xenón acoplada al disipador y a la carcasa (disipador aleteado más cubierta de plástico). Derecha: Fotografía de la fuente de alimentación de la lámpara*

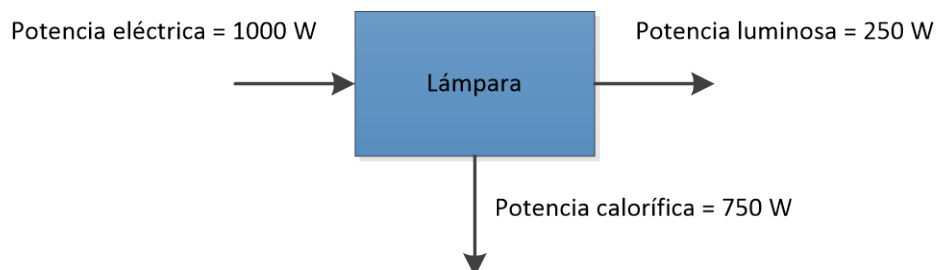
Para resolver este problema se realizó un estudio teórico para conocer qué flujo de aire forzado es necesario para poder refrigerar de forma eficiente la lámpara.

La primera decisión que se tomó fue la de que el ventilador tomara aire desde el interior de la máquina hacia el exterior, es decir, el ventilador toma aire frío del interior de la estructura de la máquina y lo expulsa al exterior a mayor temperatura debido a que éste fluye por la superficie del disipador acoplado a la lámpara. Además, de esta manera se evita que entre aire sucio del exterior y se mantenga dentro de la estructura, lo que podría traducirse en una disminución de la eficiencia de refrigeración de la lámpara y de los demás aparatos.

#### **Flujo de aire mínimo del ventilador**

Para poder realizar una correcta refrigeración se debe de calcular el flujo de aire mínimo que deberá de proporcionar el ventilador. Observando con detalle el disipador de calor proporcionado, se procede a la estimación del caudal necesario.

En primer lugar, es necesario conocer la cantidad de energía calorífica que va a desprender el disipador de calor unido a la lámpara de arco de xenón adquirida.



*Figura 3.7 Esquema de potencias de entrada y salida de la lámpara de arco de xenón*

Como se puede observar en el esquema anterior, tenemos a la entrada una potencia eléctrica de 1000 W continuos. Según las especificaciones proporcionadas por Luxtel Ilc. de estos 1000 W, unos

250 W serán convertidos en potencia luminosa, con lo que podemos suponer que 750 W serán convertidos en calor.

De este modo, según la ley de enfriamiento de Newton, la tasa de transferencia de calor por convección es:

$$P \text{ (W)} = h \cdot A_{mojada} \cdot \Delta T$$

Donde

$$\begin{cases} h = \text{coeficiente de transferencia de calor} \\ A_{mojada} = \text{Área del disipador que estará en contacto con el aire del ventilador} \\ \Delta T = T_{m\acute{a}x_{lamp}} - T_{amb} = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{m\acute{a}x_{lamp}} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}; T_{amb} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

Es necesario realizar la suposición de que en todos los puntos del disipador se tiene la misma temperatura, es decir, es isotérmico.

Como puede observarse, para calcular el coeficiente  $h$  que se necesita para una correcta refrigeración se debe calcular el área mojada por al aire que fluye a través del disipador.

El disipador de calor se compone de dos piezas idénticas (una en el cátodo y otra en el ánodo de la lámpara) con un número determinado de aletas con espesor pequeño más una con cierto grosor que no se puede despreciar, como se observa en la siguiente figura.

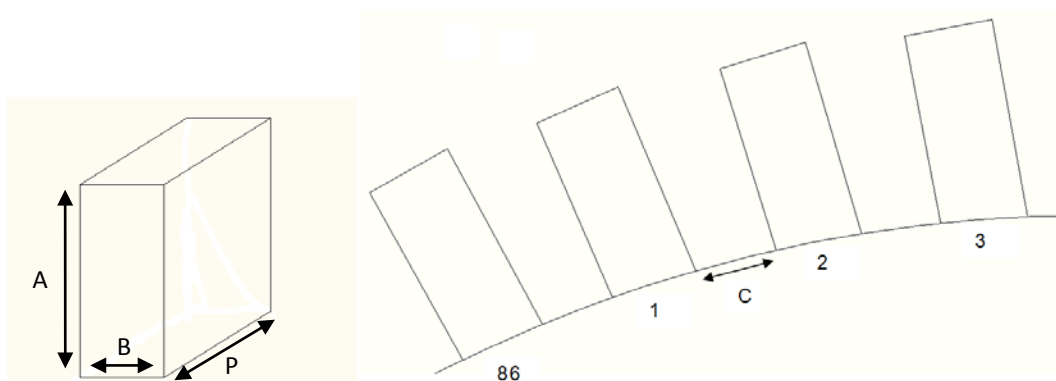


Figura 3.8 Superior: fotografía del disipador de calor proporcionado por el fabricante acoplado a la lámpara. Inferior: representación de las aletas y sus variables para el cálculo de área mojada



De la figura anterior se obtienen las siguientes variables:

$$\begin{cases} A = \text{altura de la aleta} = 12 \text{ mm} \\ B = \text{anchura de la aleta} = 1 \text{ mm} \\ P = \text{profundidad de la aleta} = 30 \text{ mm} \\ C = \text{separación entre aletas} = 2 \text{ mm} \end{cases}$$

Cada pieza se compone del siguiente número de elementos:

- 86 aletas como las descritas anteriormente
- 2 aletas centrales con las mismas características que las anteriores pero con un grosor de 9 mm
- Superficie lateral del cilindro que también estará en contacto con el aire.

Cada aleta tiene dos caras que entran en contacto con el aire, por lo tanto, el área mojada de cada una de las 86 aletas descritas anteriormente sin tener en cuenta el grosor es:

$$A_{\text{aleta}} = 2 \cdot A_{\text{cara\_aleta}} = 2 \cdot A \cdot P = 2 \cdot 12 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} = 720 \text{ mm}^2$$

Para las dos aletas centrales la ecuación, suponiendo que las aletas son idénticas salvo por el grosor que es mayor, es:

$$A_{\text{aleta\_central}} = A_{\text{aleta}} + \text{Grosor} = 720 \text{ mm}^2 + 12 \text{ mm} \cdot 9 \text{ mm} = 828 \text{ mm}^2$$

El área lateral del cilindro donde están soldadas las aletas, que también influye en la refrigeración de la lámpara, es:

$$A_{\text{lat\_cil}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

Donde

$$\begin{cases} r = \text{radio del cilindro} = 35 \text{ mm} \\ h = \text{altura del cilindro} = 30 \text{ mm} \end{cases}$$

y entonces

$$A_{\text{lat\_cil}} = 2 \cdot \pi \cdot 35 \cdot 30 = 6597.34 \text{ mm}^2 \approx 6600 \text{ mm}^2$$

El área mojada por el aire que fluye en el disipador será el doble (ya que se compone de dos piezas idénticas) de la suma del área de las 86 aletas más delgadas, la de las 2 aletas centrales y la de la superficie lateral del cilindro. Se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} A_{\text{mojada}} &= 2 \cdot (86 \cdot A_{\text{aleta}} + 2 \cdot A_{\text{aleta\_central}} + A_{\text{lat\_cil}}) \\ &= 2 (86 \cdot 720 \text{ mm}^2 + 2 \cdot 828 \text{ mm}^2 + 6600 \text{ mm}^2) = 140852 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Con todo esto, el coeficiente  $h$  necesario es:

$$h = \frac{750 \text{ W}}{141 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 85 \text{ }^\circ\text{C}} = 62.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

El disipador de calor está preparado para utilizar ventiladores de 92 mm de diámetro que tendrán un área de:

$$A_{\text{ventilador}} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 46^2 = 6647.6 \text{ mm}^2 = 6.65 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Cuando se utiliza aire forzado, la correspondencia entre la velocidad del aire y el coeficiente de transferencia de calor necesario es la que refleja a continuación:

$$\begin{cases} \text{Aire a } 1 \text{ m/s} & h = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \\ \text{Aire a } 2 \text{ m/s} & h = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \end{cases}$$

Se puede estimar que para el coeficiente  $h$  necesario se obtiene una velocidad del aire de:

$$v = \frac{62.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 2 \text{ m/s}}{15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}} = 8.3 \text{ m/s}$$

Se quiere conocer ahora el flujo de aire que pasará entre las rendijas del disipador de calor, para ello sabemos que la distancia entre aletas es de 2 mm y que el aire pasará entre aproximadamente 86 “huecos” de anchura 2 mm y de altura A. De manera que:

$$\begin{aligned} C &= \text{separación entre aletas} = 2 \text{ mm} \\ A_{\text{hueco}} &= A \cdot C = 12 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} = 24 \text{ mm}^2 = 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Con lo que queda un flujo de aire necesario de

$$\begin{aligned} \text{Flujo}_{\text{de aire necesario}} &= 86 \text{ huecos} \cdot A_{\text{hueco}} (\text{m}^2) \cdot v (\text{m/s}) \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \\ &= 86 \text{ huecos} \cdot 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot 8.3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

Se deberá de obtener un flujo mayor que ese para al menos proporcionar una temperatura máxima de 110 °C.

Una vez conocido el flujo necesario se procedió a la búsqueda de proveedores que pudieran proporcionarnos un ventilador de las siguientes características:

- Diámetro = 92 mm
- Flujo de aire  $\geq 62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Material: todos los componentes de metal, para que pueda resistir mayor temperatura.
- Cojinete: a bolas que proporciona una vida útil de larga duración y mejores características en cuanto a la temperatura.

Finalmente, se procedió a la compra del modelo 3656 del fabricante *ebmpapst* que proporciona las siguientes características:

- Axial
- Dimensiones = 92x92x38 mm
- Flujo de aire =  $75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Velocidad nominal = 2700 rpm
- Cojinete a bolas
- Rango de temperatura = -40 °C a 75 °C
- Material : todos los componentes de metal.

El acoplamiento de los dos ventiladores en serie nos permitirá mejorar características de presión y caudal, tal y como se muestra en la siguiente figura:

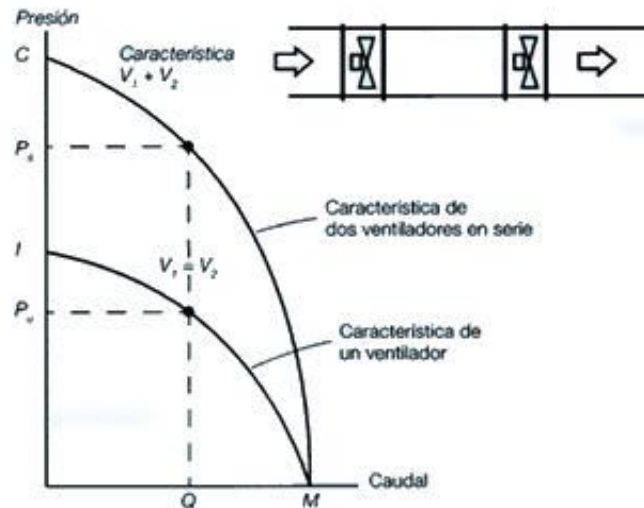


Figura 3.9 Curva característica resultante de ventiladores acoplados en serie

Se observa que para una presión constante se obtendrá un mayor caudal de aire siempre y cuando el acoplamiento sea correcto, aunque los resultados son prácticamente imperceptibles en la práctica.

Las sesiones de prueba del estrés que se van a llevar a cabo con este tipo de lámparas serán, en general, de muy larga duración (entre 10 y 12 horas), con lo cual es necesario estar completamente seguro de que la refrigeración es suficiente para no tener que interrumpir ningún ciclo antes de que éste se haya completado, ya que si la temperatura de la lámpara superara los 75 °C o comenzara a producirse humo dentro de la estructura de la máquina, la lámpara se apagaría y el ciclo quedaría incompleto, debido a los elementos de protección que se detallarán más adelante.

Por todo esto, se procedió a sobredimensionar las características del ventilador en este aspecto, adquiriendo uno que sea capaz de ofrecer un flujo mucho mayor. El modelo escogido fue el G2E108-AA01-50 del mismo fabricante que el anterior, ebmpapst. Se decidió utilizar los ventiladores axiales 3656 para expulsar aire caliente del interior de la máquina, tal y como se verá en el último apartado de este capítulo.



Figura 3.10 Ventilador modelo G2E108-AA01-50 adquirido

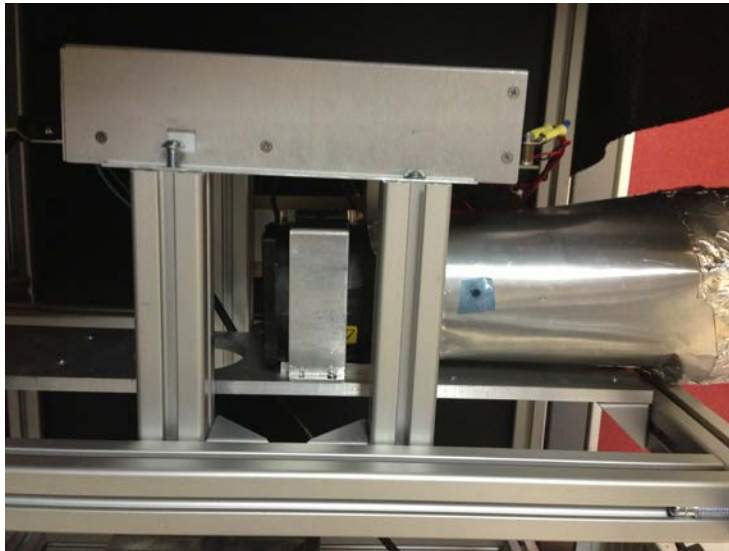
Tiene las siguientes características:

- Centrífugo
- Dimensiones compatibles con la carcasa de la lámpara de 10 mm de diámetro
- Flujo de aire =  $155 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$
- Cojinete a bolas
- Máxima temperatura ambiente = 60 °C
- Material : aluminio

#### **Caída de presión en la carcasa de la lámpara**

La caída de presión al atravesar las aletas del dissipador debe medirse para conocer en qué punto de la curva de carga trabaja el ventilador. Como esta presión va a ser pequeña se decidió medirla con una columna de agua mediante un tubo en "U".

Se procedió a la realización del siguiente montaje:



*Figura 3.11 Cono acoplado a la lámpara acabado en un ventilador de prueba para poder medir la presión que ejerce el conjunto lámpara-cubierta de plástico-dissipador*

Se utilizó un ventilador axial de gran flujo para poder realizar el experimento. Dicho experimento consiste en realizar un agujero en el cono de aluminio delgado que se puede observar en la figura anterior de manera que entre un pequeño tubo transparente de plástico. Se inserta el tubo y se deja bien sellado con silicona para que no exista ningún escape de aire y presión. A este tubo se le inserta agua mediante una jeringuilla y se observa cómo se queda en equilibrio.

De esta manera cuando se ponga en marcha el ventilador, creará una diferencia de presión entre la atmosférica (el extremo del tubo que no está insertado en el cono) y el conjunto a medir, de modo que el agua del tubo subirá en uno de sus extremos, y esa diferencia medida en cm será proporcional a la presión en Pascales.

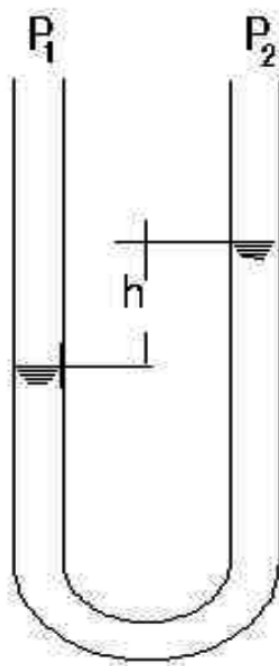


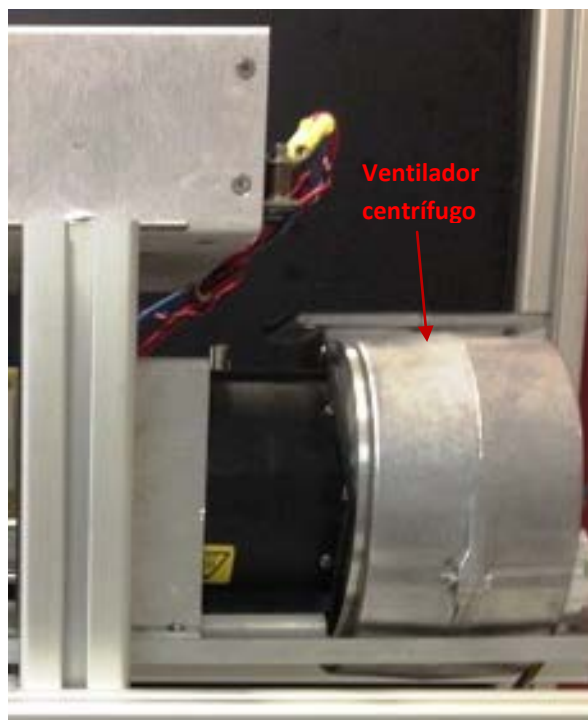
Figura 3.12 Esquema de medición de la presión. La diferencia  $h$  determinará la presión ejercida.

Al realizar el experimento se observa una diferencia de  $h = 0.5 \text{ cm}$  de modo que teniendo en cuenta  $1 \text{ Pascal} = 0.01 \text{ cm de agua}$ , se tiene una presión de

$$\text{Presión (Pascales)} = \frac{h \text{ (cm)}}{0.01 \frac{\text{cm de agua}}{\text{Pascal}}} = \frac{0.5 \text{ cm}}{0.01 \frac{\text{cm de agua}}{\text{Pascal}}} = 50 \text{ Pascales}$$

El ventilador de prueba acoplado proporciona una velocidad del aire a la entrada de la lámpara (medida con un anemómetro) de valor de  $5 \text{ m/s}$ , más o menos constante en toda su superficie.

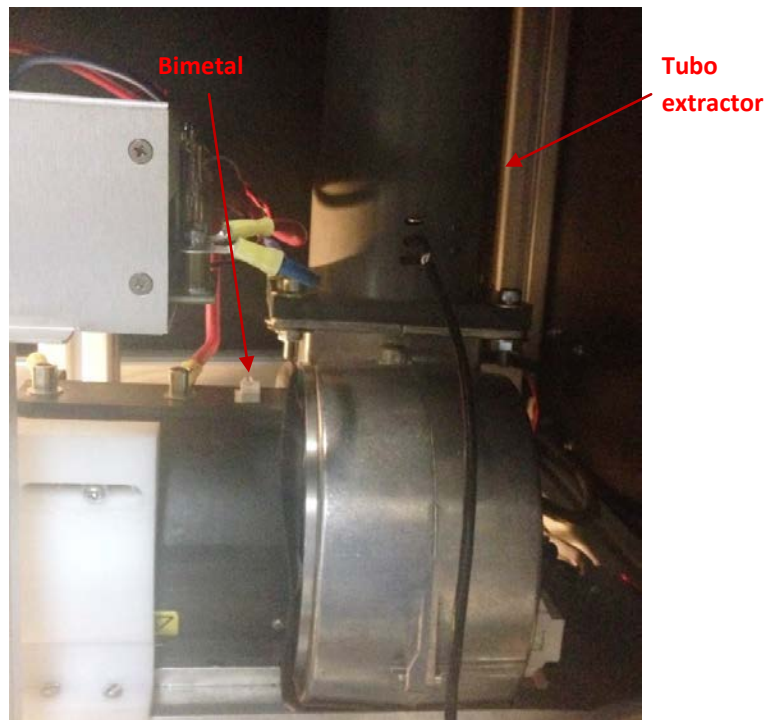
Con el ventilador centrífugo acoplado a la carcasa de la lámpara, la velocidad del viento que éste proporciona a su salida en media es de  $10 \text{ m/s}$ , lo que según las curvas de presión proporcionadas por el fabricante equivale a una caída de presión a vencer de unos  $100 \text{ Pascales}$ , lo que es coherente ya que este ventilador proporciona el doble de velocidad del viento que el de prueba y por tanto, también dobla la caída de presión.



*Figura 3.13 Ventilador centrífugo acoplado a la lámpara de arco de xenón*

En conclusión, el ventilador escogido debería de ser totalmente válido para una correcta refrigeración de la lámpara.

### **Tubo extractor**

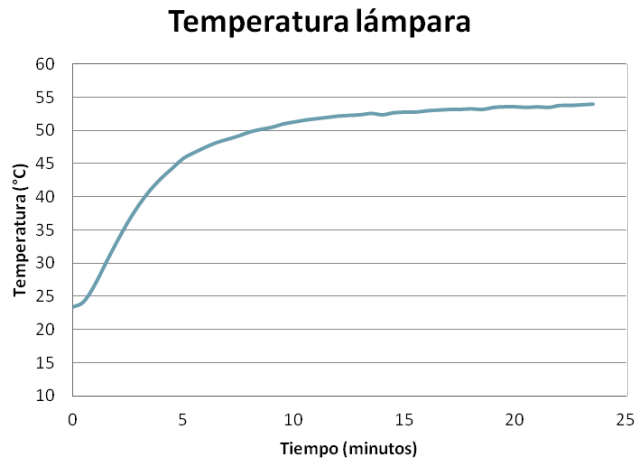


*Figura 3.14. Ventilador centrífugo al que se le ha acoplado un tubo extractor, además de un bimetal de protección acoplado a la lámpara.*

Una vez que la máquina queda sellada con paneles, es necesario acoplar al ventilador un tubo extractor de PVC (*Policloruro de vinilo*) que empieza a reblandecerse a los 80°C y se descompone a los 140°C. Se fija un bimetal a la lámpara para que se abra a los 75°C y la apaga para evitar daños (la temperatura máxima que soporta la lámpara según el fabricante es de 110 °C) . De este modo el PVC es completamente válido para extraer de forma adecuada el aire.

### **Variación de temperatura en la lámpara**

Con el termopar acoplado a la lámpara, se procede a medir la variación de temperatura de la lámpara a una potencia de aproximadamente 800 W, que es la potencia máxima que se va a utilizar en condiciones normales, o sea, no será necesario llegar hasta los 1000 W que consume, a lo sumo, la lámpara en prácticamente ningún caso, debido a que se usarán elementos ópticos secundarios para conseguir la concentración deseada en la célula.



*Figura 3.15 Variación de la temperatura en la carcasa de la lámpara, medida con un termopar tipo K a una potencia de lámpara 800 W.*

Como puede observarse en la anterior figura, la temperatura prácticamente se estabiliza antes de llegar a los 55 °C después de que la lámpara lleve unos 25 minutos funcionando a 800 W. Todavía se tendrían unos 20 °C de margen hasta que actúe el bimetálico, y más de 50 °C hasta que la lámpara se estropee.

Con este experimento se puede concluir que el ventilador acoplado es lo suficientemente potente, en cuanto a flujo de aire extraído, para una correcta refrigeración de la lámpara.

### 3.2.2.3 MEDIDA DE LA EXTENSIÓN ANGULAR DEL HAZ LUMINOSO DE LA LÁMPARA

Es de suma importancia conocer una serie de parámetros de la lámpara que van a ser determinantes a la hora de poder concentrar la máxima cantidad de luz en la parte activa de la célula.

El parámetro más importante, que es el que limita el tamaño del spot de luz incidente en las células a probar, es la extensión angular del haz luminoso de la lámpara, entendiéndose como tal la desviación máxima en los ángulos de los rayos de luz de salida de la lámpara. Si el haz procedente de ésta fuera perfectamente colimado se tendría una extensión angular de 0°, lo que proporcionaría el spot más pequeño posible en la célula, es decir, un spot de dimensiones casi nulas donde se concentraría toda la potencia luminosa que sale de la lámpara y el espejo fuera del eje se encarga de concentrar en un punto.

Para conocer la distribución de luz a la salida de la lámpara, se utiliza una cámara CCD (*Charge-Coupled Device*) colocada en un plano perpendicular a los rayos de luz. El objetivo de la cámara está situado en el punto que corresponde al centro del espejo concentrador (espejo fuera del eje), donde se puede suponer que se trabaja con óptica de campo cercano. La fotografía se captura con el diafragma de la cámara totalmente cerrado y ésta se encuentra enfocando al infinito.



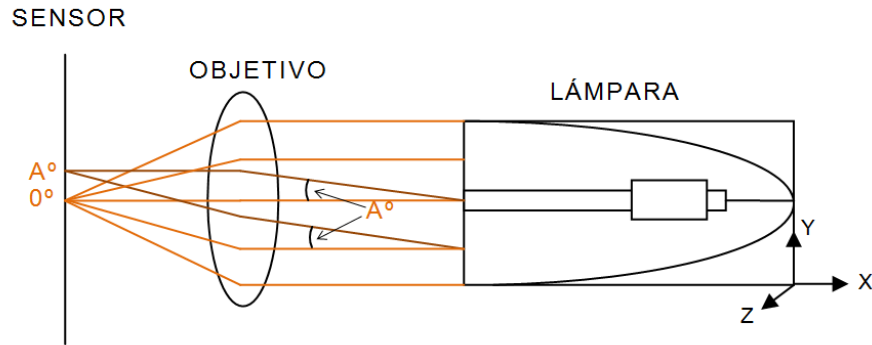


Figura 3.16 Esquema de posicionamiento de los elementos para calcular la extensión angular de la lámpara

Se toman 3 fotografías: una con la cámara concéntrica con la lámpara, otra desplazando ésta a través del eje z hacia la izquierda y otra desplazándola hacia la derecha, tal y como se muestra en la siguiente figura:

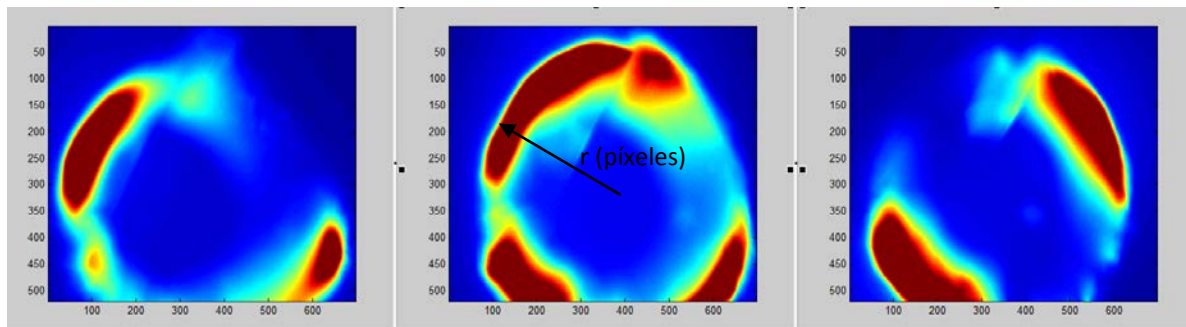


Figura 3.17 Captura que muestra la distribución de luz con la cámara en tres posiciones diferentes

La imagen central corresponde a la situación en la que la cámara CCD (*Charge-Coupled Device*) se encuentra situada concéntricamente con el eje de revolución de lámpara. Las imágenes de la izquierda y de la derecha corresponden con las situaciones en las que la cámara se ha desplazado a través del eje z (izquierda eje positivo, derecha eje negativo).

Con todos estos datos es posible representar el perfil de la distribución de intensidad angular de iluminación con la cámara situada en la posición central, que es la posición donde se va a encontrar el espejo concentrador, así como la energía acumulada en función del ángulo de incidencia de la luz y su perfil por coronas.

Estos conceptos se explican a continuación:

### **Energía acumulada**

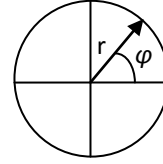
La imagen captada por la cámara se puede interpretar como una matriz de datos, donde éstos son numéricos y representan valores de intensidad de píxel.

Es decir, la imagen se puede representar como una matriz  $Z(x, y)$  en coordenadas cartesianas y  $Z(r, \varphi)$  en cilíndricas, donde cada punto representa el valor de un píxel.

El valor de la imagen es proporcional a un diferencial de energía que llega al punto  $(r, \varphi) \rightarrow Z(r, \varphi) = d^2F(r, \varphi)$

La energía total que viene de la fuente es:

$$F = \int_0^R \int_0^{2\pi} d^2F(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi$$



siendo  $R$  el radio total de la imagen.

La energía acumulada se define como la energía circunscrita hasta un radio  $r$ , es decir:

$$\text{Energía acumulada}(r) = F(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} d^2F(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi$$

### Perfil por coronas

La contribución de cada corona circular de radio  $r$  a la energía total es

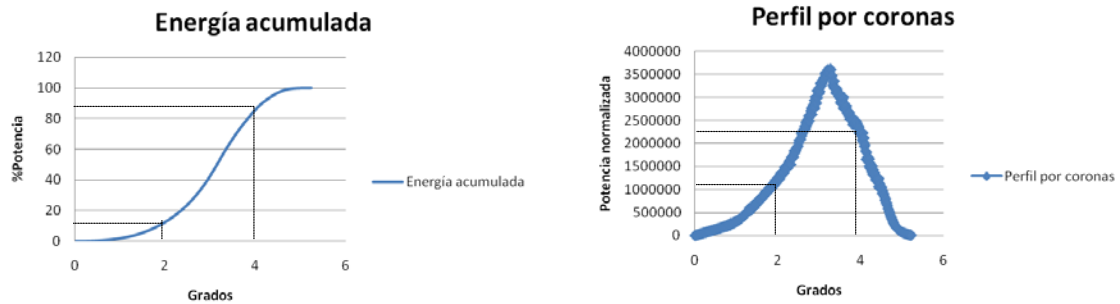
$$\text{Perfil por coronas}(r) = \frac{dF(r)}{dr}$$

donde

$$dF(r) = \int_0^{2\pi} d^2F(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \int_0^{2\pi} Z(r, \varphi) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = Z(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \rightarrow \frac{dF(r)}{dr} = Z(r) \cdot 2\pi r$$

donde  $Z(r) \cdot 2\pi r$  representa la suma de todos los píxeles que están a una distancia  $r$  del centro y  $Z(r)$  es el valor medio de los píxeles  $Z(r, \varphi)$  para  $r$  constante.

### Resultados



*Figura 3.18 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: perfil por coronas. Ambas para la posición central.*

Tal y como se indicó anteriormente, la cámara enfoca al infinito, esto conlleva que la distancia entre puntos medida en píxeles equivale a la distancia medida en grados de inclinación mediante una constante de conversión proporcionada por la cámara y que depende de la distancia focal utilizada. Es decir, todos los píxeles situados a la misma distancia radial del centro del spot tienen el mismo valor absoluto de inclinación.

La energía acumulada representa la cantidad de energía circunscrita hasta un radio  $r$  determinado, o sea, hasta una inclinación de rayos determinada medida en grados.

Sin embargo, el perfil por coronas representa la energía o potencia que contiene una corona con radio  $r$  y espesor  $dr$  medidos en píxeles que se convierten, de nuevo, en grados.

Cada punto de la curva contiene la suma de los valores de intensidad de los píxeles contenidos en la corona de radio  $R$  correspondiente. Esto es:

$$\text{Perfil por coronas } (R) = \sum_{\substack{\varphi=0 \\ r=R}}^{\varphi=2\pi} Z(r, \varphi)$$

De la gráfica de la energía acumulada se deduce que los rayos con inclinación de  $4^\circ$  o menos contienen el 90% de la potencia luminosa de la lámpara. Además, se observa que la mayor parte de esta potencia se concentra en los rayos con inclinación entre  $2^\circ$  y  $4^\circ$ . Esto se debe a que los rayos con inclinación de  $2^\circ$  o menos acumulan menos de un 10% del total de potencia. Esta última deducción también se observa en la gráfica del perfil por coronas ya que entre  $2^\circ$  y  $4^\circ$  se obtienen los valores más altos de potencia normalizada.

---

### 3.2.3 ESPEJO FUERA DEL EJE (*OFF-AXIS MIRROR*)

---

#### 3.2.3.1 DESCRIPCIÓN TEÓRICA

Los espejos parabólicos son el tipo más común de espejos asféricos usados en instrumentos ópticos. Están libres de aberraciones esféricas, con lo que son capaces de focalizar un haz de luz colimado en un punto. En muchos sistemas ópticos no es necesario el uso de la abertura que tiene simetría rotacional completa.

Para estos sistemas, como es la máquina LYSS, los espejos parabólicos fuera del eje ofrecen una serie de ventajas sobre los paraboloides tradicionales.

En resumen puede decirse que un espejo parabólico fuera del eje es, en esencia, una porción de un espejo parabólico estándar que tiene la característica de dirigir y concentrar la luz colimada incidente a un ángulo específico, permitiendo de esta forma acceso libre al punto focal.

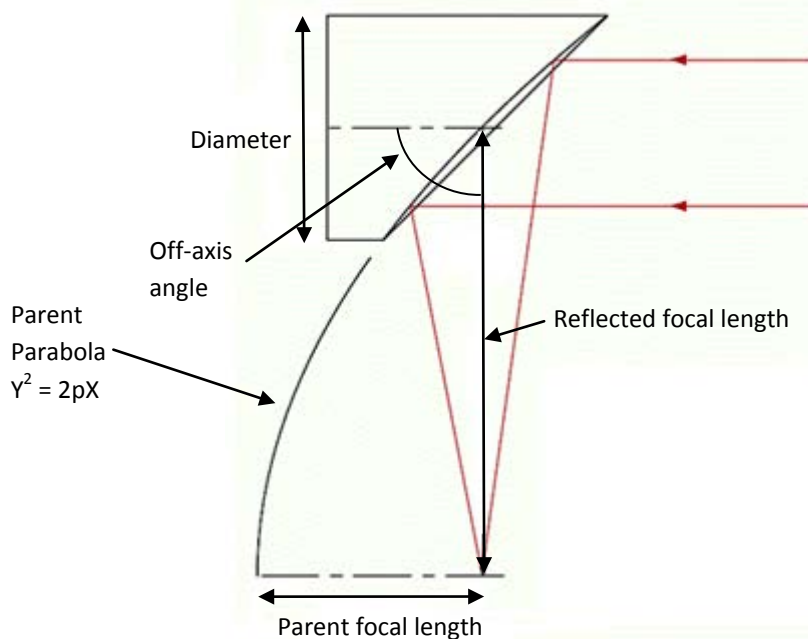


Figura 3.19 Muestra el funcionamiento de un espejo parabólico fuera del eje (*off-axis mirror*) que refleja y concentra el haz colimado hacia el foco de la parábola original del que procede. De esta manera se puede elegir un cierto ángulo de reflexión con respecto al eje central del espejo.

### Parámetros

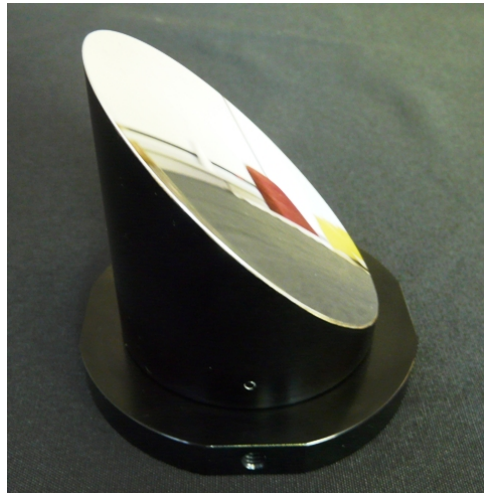
Tal y como se puede observar en la Figura 3.19. los parámetros principales que tiene cualquier espejo de fuera del eje (*off-axis mirror*) son los siguientes:

- Diámetro (*Diameter*): es el diámetro efectivo del espejo, se debe de tener muy en cuenta ya que limitará el tamaño del spot colimado máximo que es capaz de reflejar.
- Distancia focal padre (*Parent Focal Length*): es la distancia al foco del paraboloide padre (*Parent Parabola*)  $Y^2 = 2 \cdot p \cdot X$ , es decir, de la parábola original de donde se extrae el trozo que nos permita reflejar el haz con el ángulo escogido.
- Longitud focal reflejada (*Reflected focal length*): es la distancia entre el centro mecánico del espejo parabólico fuera del eje y el foco de la parábola padre. Esta distancia influye en el offset vertical que existe desde el centro del espejo fuera del eje y el punto focal de la parábola padre. De esta manera hay que tener en cuenta que para conseguir el mínimo spot posible es necesario que el punto donde se quiera focalizar el haz colimado debe de estar a esa distancia en el eje vertical.
- Ángulo *off-axis* (*Off-axis angle*): ángulo entre la línea central óptica del espejo y la línea que define la longitud focal efectiva reflejada.

### 3.2.3.2 MODELO ESCOGIDO

Se tomó la determinación de adquirir un modelo de espejo fuera del eje con ángulo *off-axis* de  $90^\circ$ , es decir, concentra los rayos de luz en un punto situado a  $90^\circ$  de su centro óptico. De esta manera, la placa enfriadora se sitúa justo debajo de del espejo, lo que permite manipular los elementos de una manera relativamente sencilla.

El modelo de  $90^\circ$  que se adquirió procede del distribuidor y fabricante *EDMUND OPTICS*. Tiene un diámetro de 76.2 mm que es mayor que el tamaño del spot de salida de la lámpara (50.2 mm) para así asegurar que todos los rayos de salida de ésta inciden en la superficie del espejo. La altura a la que deben situarse las muestras debe de ser de 177.8 mm (que es su longitud focal reflejada) para conseguir el mínimo tamaño de spot.



*Figura 3.20 Espejo fuera del eje de  $90^\circ$  adquirido del fabricante EDMUND OPTICS acoplado al plato diseñado por el fabricante*

---

#### 3.2.3.3 CÁLCULO DEL SPOT MÁXIMO CREADO EN LA CÉLULA

Con toda seguridad, la extensión angular de la lámpara adquirida va a aumentar el tamaño del spot que se desearía en la célula. Su valor da una idea del tamaño máximo que cabría esperar de éste.

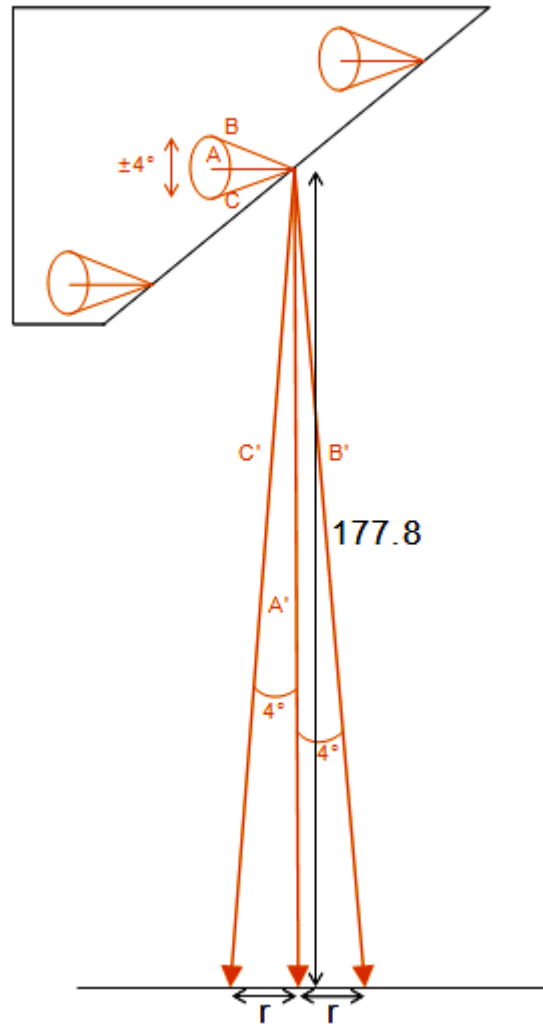


Figura 3.21 Esquema que representa cómo calcular el tamaño aproximado del spot teniendo una extensión angular de  $4^\circ$ .

Se establece que la extensión angular máxima es de  $4^\circ$  lo que conlleva que los rayos que inciden en el espejo desde una posición determinada de la lámpara pueden llegar con una inclinación de entre  $\pm 4^\circ$  en las 3 direcciones espaciales, representado en la figura como un cono de luz que contiene todos los rayos posibles en ese rango de ángulos de inclinación.

De esta manera, se puede definir la aproximación del radio del spot ( $r$ ) como la diferencia entre la posición de llegada del rayo  $A'$ , proveniente del rayo  $A$  que tiene inclinación de  $0^\circ$ , y la de cualquiera de los otros dos rayos de la figura ( $B'$  y  $C'$ ) que provienen de rayos que poseen la inclinación máxima ( $+4^\circ$  para  $B$  y  $-4^\circ$  para  $C$ ).

Sabiendo que la distancia entre el centro del espejo y el foco es de 177.8 mm se establece la siguiente relación:

$$\operatorname{tg}(4^\circ) = \frac{r}{177.8} \rightarrow r = 177.8 \cdot \operatorname{tg}(4^\circ) = 1.2 \text{ cm} \rightarrow \text{diámetro}_{\text{spot}} = 2.4 \text{ cm}$$

Por tanto, el spot creado en la posición donde se encuentran las células a testear tiene un tamaño teórico máximo de 2.4 cm de diámetro.

### 3.2.3.4 OTROS PROBLEMAS ENCONTRADOS

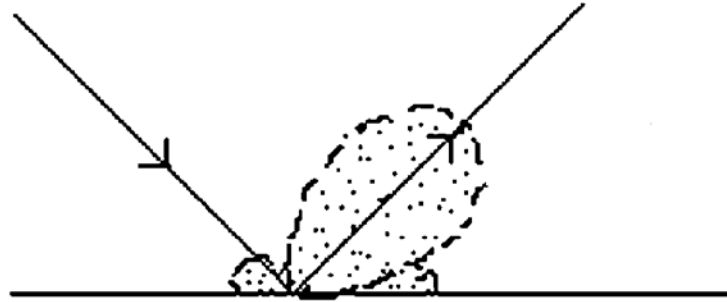
El principal problema encontrado es más dependiente de la extensión angular de la lámpara anteriormente calculada que del espejo propiamente dicho, ya que como los rayos que inciden en la superficie de éste no tiene un ángulo de 0° respecto a su normal, se tendrá una cierta desviación que se traduce en un tamaño del spot con mayor diámetro que el óptimo, como ya se conoce.

Empíricamente se observó en el laboratorio que usando un haz colimado con anchura angular de unos  $\pm 0.4^\circ$ , el tamaño del spot a 177.8 mm era aproximadamente una circunferencia de unos 0.5 cm de diámetro.

Además de este factor, según el fabricante, la superficie del espejo tiene una rugosidad media máxima de 175 Å lo que podría provocar problemas como la dispersión de la luz (*scattering*).

#### Dispersión de la luz (*scattering*)

La dispersión de la luz es el fenómeno físico mediante el cual la incidencia de un rayo de luz en una superficie con una cierta rugosidad conlleva que se produzcan varios rayos de luz reflejados con distintos ángulos de reflexión, en lugar de la situación ideal que produciría un sólo rayo reflejado con ángulo de reflexión conocido. La siguiente figura ilustra este fenómeno:



*Figura 3.22 Representación de la dispersión de la luz (*scattering*) que puede producirse por un rayo de luz cuando éste incide en una superficie ligeramente rugosa*

Sin lugar a dudas, la consecuencia de que se produzca este fenómeno es la de que el tamaño del spot creado por los rayos de luz reflejados por el espejo se agrande aún más.

La dispersión integrada total (*TIS*, *Total Integrated Scatter*) representa la cantidad total de luz que dispersa una superficie con una rugosidad media determinada. La siguiente ecuación describe la relación funcional entre la dispersión óptica y la rugosidad media de la superficie:

$$TIS(R_q) = R_0 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{4\pi R_q \cos \theta_i}{\lambda}\right)^2} \right]$$

donde  $R_0$  es la reflectancia teórica de la superficie,  $R_q$  es la rugosidad media de la superficie,  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia en la superficie y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz incidente.

En este caso, como ya se conoce, la superficie del espejo fuera de eje (*off-axis mirror*) utilizado en la máquina LYSS tiene una rugosidad media con valor máximo de  $R_q = 175 \text{ Å} = 17.5 \text{ nm}$ . La reflectancia

media de la superficie de este espejo en el rango de longitudes de onda de la lámpara de arco de xenón tiene un valor de  $R_0 = 0.9$ , según el fabricante. Introduciendo como ángulo de incidencia  $\theta_i = 45^\circ$  y trabajando en una longitud de onda de  $\lambda = 900 \text{ nm}$  se obtiene un valor de dispersión integrada total  $TIS (17.5 \text{ nm}) = 2.65\%$ .

Según las especificaciones de la lámpara de arco de xenón la mayor contribución en la potencia total se produce en el rango de longitudes de onda de 800 nm a 1100 nm. Esto conlleva que la dispersión de la luz producida no va a aumentar notablemente el tamaño del spot, en el que la mayor influencia en su tamaño se debe a la extensión angular de la lámpara.

---

### 3.2.3.3 MOVIMIENTO DEL HAZ

#### 3.2.3.3.1 INTRODUCCIÓN

---

Como se ha explicado en apartados anteriores, el dispositivo está diseñado para poder realizar el test de dos células simultáneamente. Para ello es necesario que el spot de luz que crea el espejo fuera del eje sea capaz de moverse de una célula a otra.

El espejo debe de girar en alguno de los ejes de los que dispone. Para conseguir el resultado óptimo se realizan una serie de simulaciones por ordenador mediante la herramienta *LightTools*.

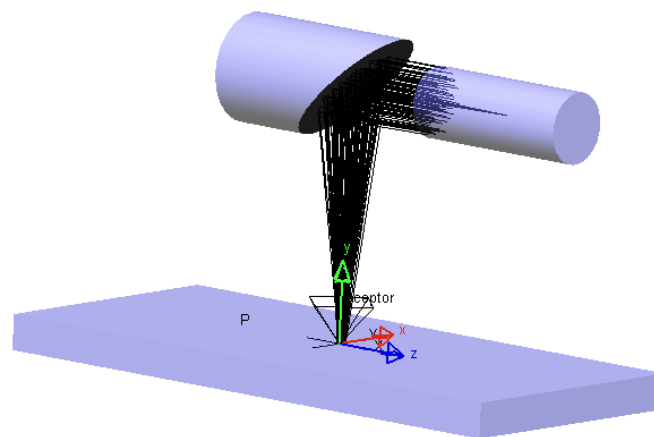
#### 3.2.3.3.2 SIMULACIONES

---

Para estas simulaciones no se tuvo en cuenta la dispersión de la luz (*scattering*) debida a la rugosidad de la superficie del espejo fuera del eje, así como la anchura angular de la fuente, que hace que el spot aumente su diámetro de forma considerable. Aún así, éstas proporcionan una idea válida para poder escoger el eje de rotación óptimo ya que, como se verá más adelante, éste influye notablemente.

##### **Posición inicial**

En primer lugar se toma como referencia el spot que crea el espejo a una altura de 177.8 mm cuando focaliza un haz proveniente de una fuente de diámetro de 50.8 mm, con extensión angular de  $0^\circ$  y sin dispersión de ningún tipo.



*Figura 3.23 Escenario de simulación creado en LightTools con la disposición original de los elementos ópticos.*



En esta posición el spot creado es el siguiente:

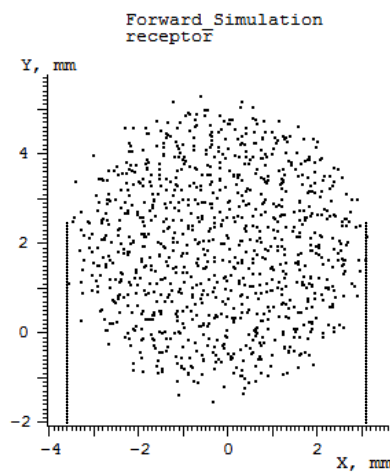


Figura 3.24 Simulación del spot creado por el espejo fuera del eje en la posición original

Se puede observar que se obtiene un spot de unos 3.5 mm de radio en el mejor de los casos.

### Giro ángulo $\alpha$

Se procede a simular un giro de  $15^\circ$  (qué es aproximadamente lo que se deberá de inclinar como se explicará más adelante) del ángulo  $\alpha$  definido por *LightTools*. La simulación queda de la siguiente manera:

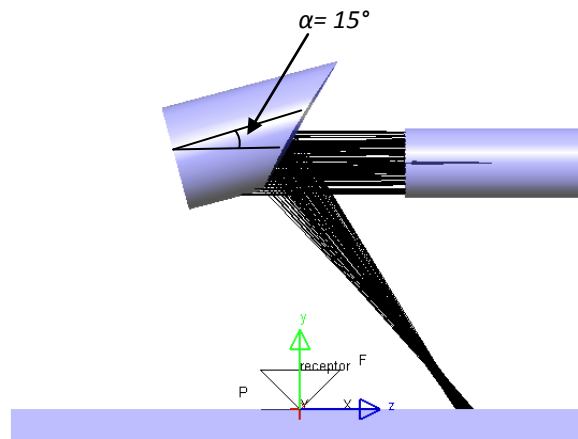


Figura 3.25 Escenario de simulación para  $\alpha = 15^\circ$ , giro alrededor del eje X.

Con esta disposición el spot creado para  $\pm 15^\circ$  es:

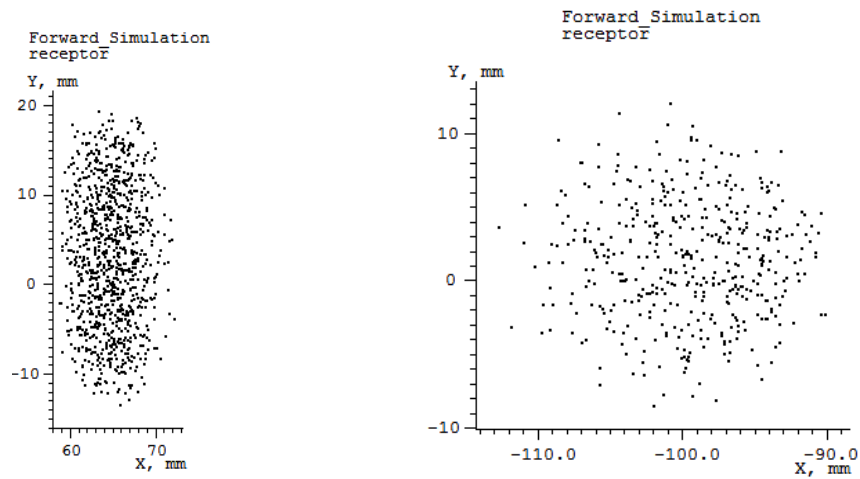


Figura 3.26 Spots creados para  $\alpha = 15^\circ$  (izquierda) y para  $\alpha = -15^\circ$  (derecha).

Se observa que los spots creados en este caso no son nada compatibles con el propósito de la máquina, donde se necesita el spot mínimo posible y con forma similar a una circunferencia.

### Giro ángulo $\beta$

De la misma manera se procede a girar con ángulo  $\beta$ , de forma que el escenario producido es:

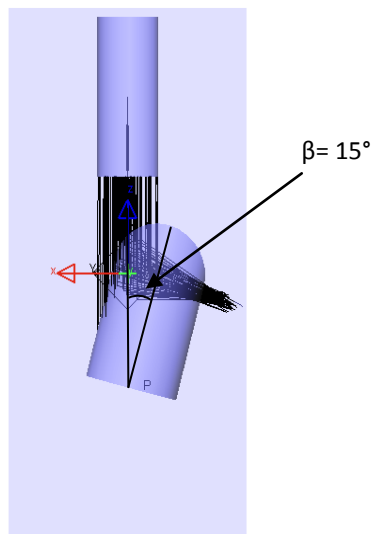


Figura 3.27 Escenario de simulación para  $\beta = 15^\circ$ , giro alrededor del eje Y.

Los spots creados en este caso son:

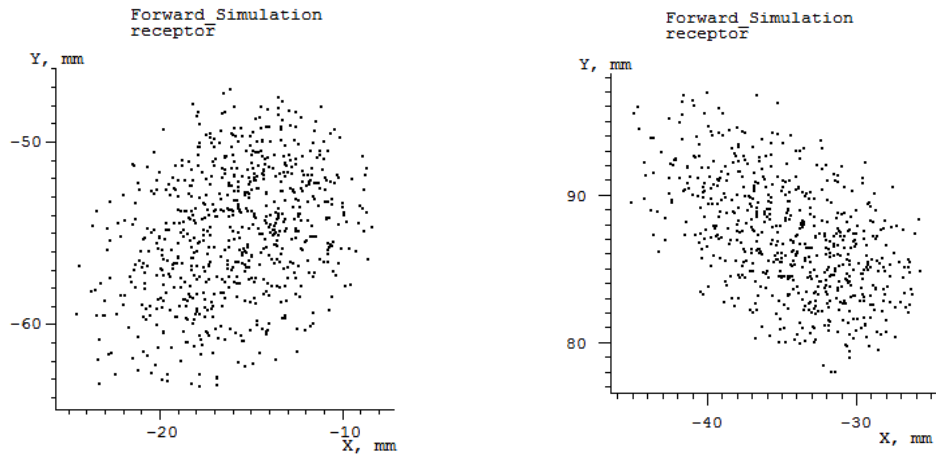


Figura 3.28 Spots creados para  $\theta = 15^\circ$  (izquierda) y para  $\theta = -15^\circ$  (derecha).

Se deduce lo mismo que para el anterior eje, se crean spots poco uniformes y con, presumiblemente, diámetro muy largo (unos 20 mm) para estas condiciones de simulación en el que no existen perturbaciones.

### Giro ángulo $\gamma$

En este caso el ángulo  $\gamma$  es el ángulo de giro del espejo respecto a su eje óptico central y el escenario de simulación es el siguiente:

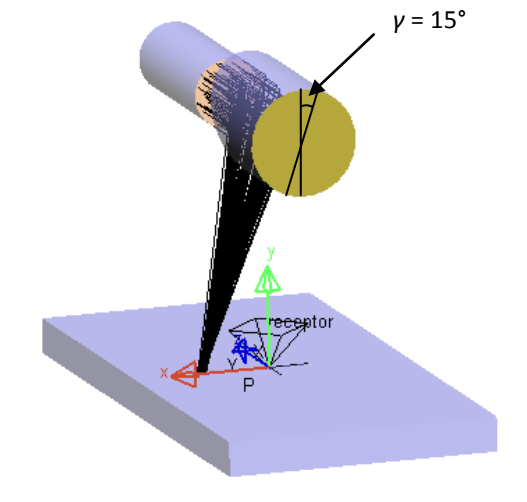


Figura 3.29 Escenario de simulación para  $\gamma = 15^\circ$ , giro alrededor del eje Z.

En este caso los spots creados son:

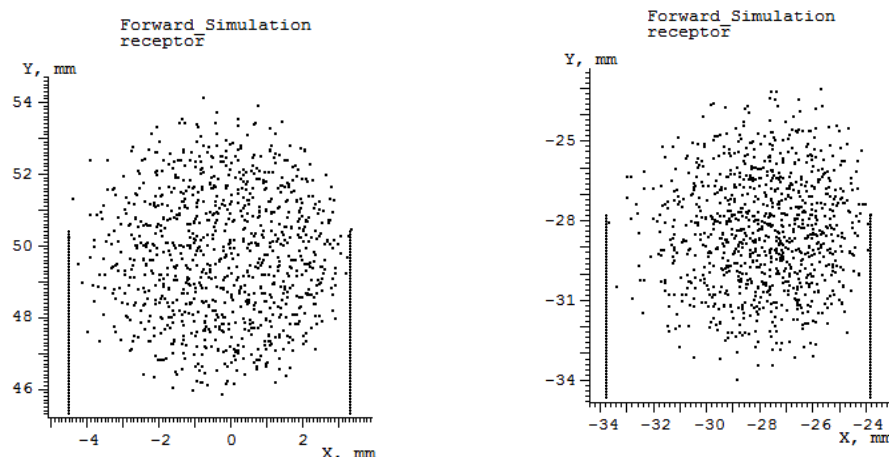


Figura 3.30 Spots creados para  $\gamma = 15^\circ$  (izquierda) y para  $\gamma = -15^\circ$  (derecha).

En este caso los spots creados son muy similares al spot creado en la posición original, ambos de unos 5 mm de radio.

Claramente este es el mejor escenario en el que se va a trabajar a la hora de mover el spot de una célula a otra. Estos tamaños de spot se verán modificados en gran parte por la extensión angular de la lámpara real y, en menor medida, por la dispersión (*scattering*) producida debido a la rugosidad del espejo fuera del eje.

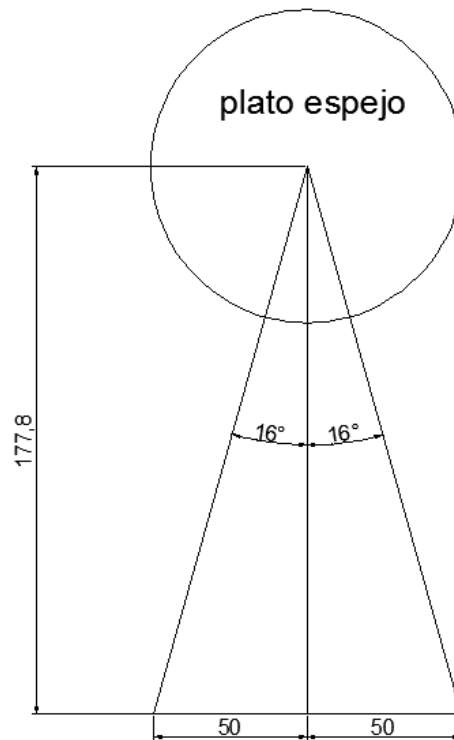
Una vez escogida la manera en la que se va a rotar el espejo, es necesario diseñar una estructura válida para poder realizar la rotación del espejo en el eje escogido.

Debido a que el espejo adquirido incluye un plato donde éste se acopla justo en el eje de rotación, es relativamente sencillo realizar el movimiento con la ayuda de un actuador lineal.

### 3.2.3.3.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE MOVIMIENTO DEL HAZ

Se llega a la determinación de que lo ideal es acoplar una varilla de aluminio al eje de rotación del espejo de manera que el actuador lineal la desplace hacia arriba y abajo de manera que el espejo gire sobre el eje Z. El propio plato que incluye el espejo contiene los agujeros roscados necesarios para poder acoplarle un eje de giro a medida, que junto a dos rodamientos acoplados a él permite el giro.

Es necesario conocer la separación entre las dos muestras a testear. Parece apropiado elegir la distancia de 10 cm y así tener un margen lo suficientemente alto para que parte de la luz que va a una célula no llegue a la otra y el efecto térmico sea despreciable.



*Figura 3.31 Muestra el ángulo de giro que tiene que realizar el espejo para conseguir que la distancia entre muestras sea de 10 cm.*

El siguiente paso es escoger el actuador lineal idóneo (longitud del brazo) para realizar el giro. Para tener la mayor precisión posible se fuerza a que las dos posiciones de las muestras coincidan, en la medida de lo posible, con los finales de carrera del actuador lineal, de tal manera que una de ellas coincide con el actuador lineal totalmente extendido y la otra con éste totalmente recogido.

En definitiva hay que escoger la longitud del brazo del actuador y la de la varilla que irá acoplada al eje del espejo.

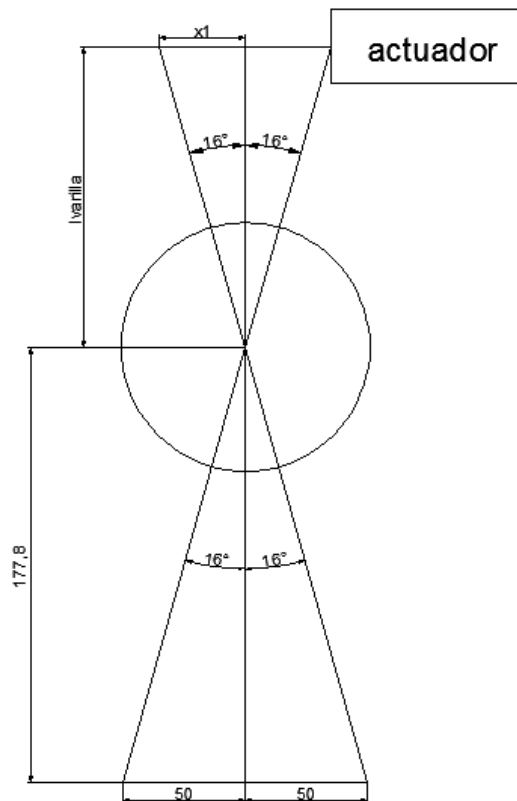


Figura 3.32 Muestra la disposición de los diferentes elementos y variables a tratar.  $x_1$  se corresponde con la mitad de la longitud del brazo del actuador lineal y  $l_{varilla}$  es la longitud de la varilla a calcular.

Con esto tenemos que  $\tan 16^\circ = \frac{x_1}{l_{varilla}}$ ;  $l_{varilla} = x_1 / \tan 16^\circ$

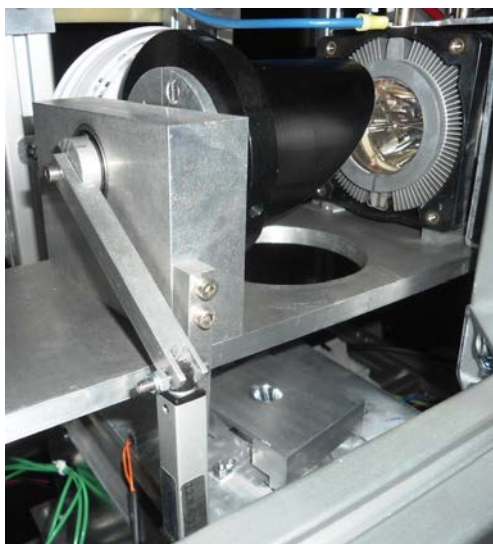
Los actuadores lineales comunes suelen tener un brazo de 50 mm o 100 mm, con lo que el estudio sólo tendrá en cuenta esas dos posibilidades.

	<b><math>x_1 = 25 \text{ mm}</math></b>	<b><math>x_1 = 50 \text{ mm}</math></b>
<b><math>l_{varilla}</math></b>	100 mm	200 mm

Tabla 3.1 Longitud de la varilla con respecto a la longitud del brazo del actuador lineal

Se escoge la varilla de 100 mm ya que la de 200 mm podría ser inviable en nuestro proyecto, no es necesario tener una varilla de tanta longitud que pueda condicionar el diseño de la estructura general.

En conclusión, la estructura que se propone para realizar el giro se muestra a continuación:



*Figura 3.33 Estructura de giro del espejo fuera del eje*

Se observa como el proceso de giro del espejo se basa en la varilla de longitud calculada que está acoplada a un eje que, a su vez, se encuentra acoplado al centro del plato del espejo, produciendo así el giro deseado.

Mediante software se podrán especificar las posiciones del actuador lineal que corresponden a cada célula, como se explicará más adelante.

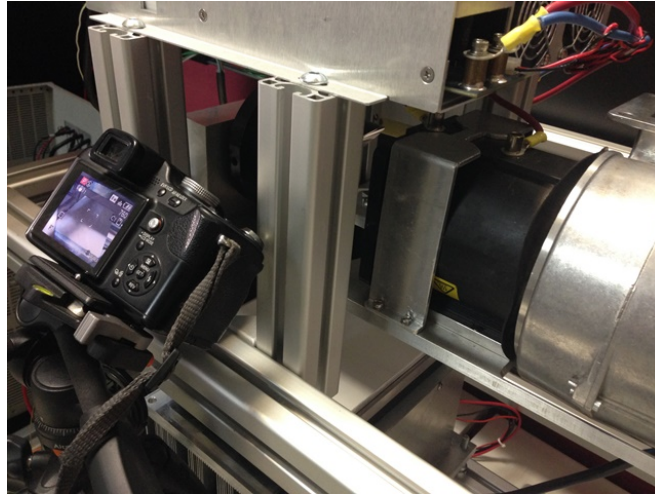
Además, como puede observarse, en esta estructura se aborda también el acoplamiento de la lámpara y el ventilador asociado para conseguir que la lámpara y el espejo estén perfectamente alineados de forma concéntrica.

#### 3.2.3.4 MEDIDAS EXPERIMENTALES

Es altamente importante conocer el tamaño del spot final que se tendrá a la distancia donde estarán situadas las células de prueba.

La estructura donde va colocada la placa enfriadora (*Cold Plate*) permite variar la altura de éste con un rango de unos  $\pm 3$  cm, por ello fue posible tomar 3 fotografías del punto de luz que crea el espejo con los rayos que le llegan de la lámpara a una distancia entre el centro del espejo al foco de  $177.8 \pm 15$  mm, siendo 177.8 mm la distancia óptima según el fabricante.

Resultó imposible realizar dicha fotografía con el objetivo de la cámara concéntrico con el spot por razones de espacio, por ello fue necesaria una reconversión geométrica de los resultados mediante un script en *Matlab* con el objetivo de calcular las constantes mm/píxeles para cada eje (horizontal y vertical) y así poder representar la distribución de la luz en el spot creado.

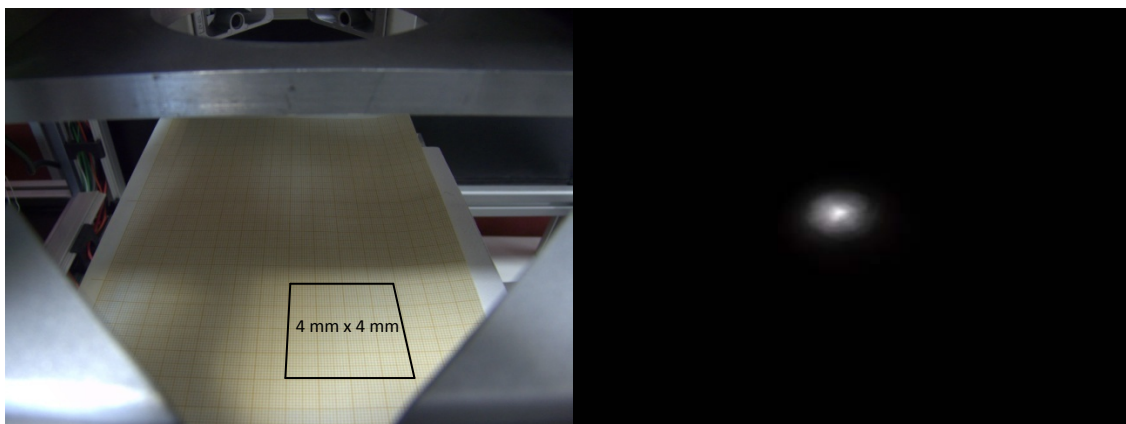


*Figura 3.34 Montaje realizado para medir el tamaño del spot*

La cámara utilizada es una cámara digital con capacidad de almacenar las fotografías con extensión *.RAW* (formato de imagen sin pérdidas) que permite tratar digitalmente los archivos de imagen creados y calcular los diferentes perfiles de potencia.

Las primeras imágenes que se adquirieron mostraban una gran cantidad de píxeles saturados. Debido a ello fue necesario acoplar al objetivo dos filtros ópticos del 1%, es decir, solo deja pasar un 1% de la luz incidente en dicho objetivo.

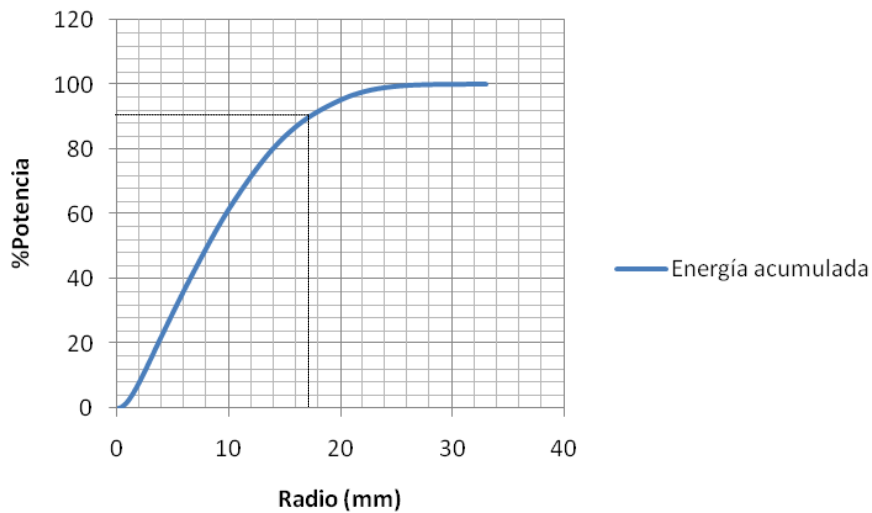
**Distancia 177.8 mm**



*Figura 3.35 Izquierda: muestra la imagen de referencia que es utilizada para calcular las constantes. Derecha: captura del spot que se crea a la distancia óptima.*

Introduciendo el valor de las constantes calculadas por el script de Matlab y analizando pixel a pixel los datos mediante un programa de *LabVIEW* programado para ello, se obtienen los siguientes resultados:



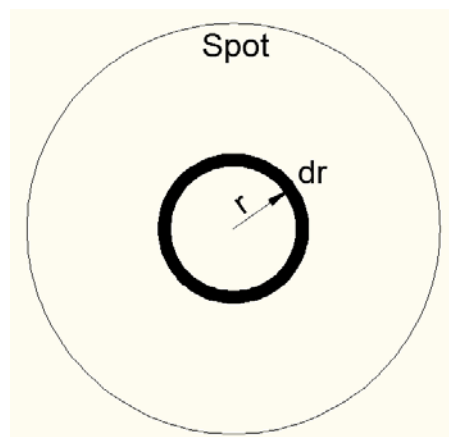


*Figura 3.36 Gráfica de la energía acumulada para una distancia del centro del espejo al foco de 177.8 mm*

Como ya se ha explicado, la energía acumulada se define en este caso como la energía o potencia circunscrita hasta el radio  $r$ .

Se puede observar el spot contiene un 90% de la potencia para un radio de aproximadamente 1.7 cm. Este resultado tiene concordancia con el resultado teórico que se obtuvo en un apartado anterior en el que se valoraba el radio en unos 1.4 cm.

Con los datos de adquisición de la cámara y las constantes calculadas es posible calcular además el perfil por coronas. Como ya se explicó con anterioridad, este perfil consiste físicamente en tomar muestras de valores de intensidad luminosa siguiendo un patrón de coronas de radio variable con centro en el centro del spot, es decir, representa la cantidad de luz contenida en coronas de radio variable y grosor  $dr$ , como se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 3.37 Representación de medida de una corona en el perfil por coronas para la medida del tamaño del spot creado por el espejo fuera del eje*

El resultado es el siguiente:

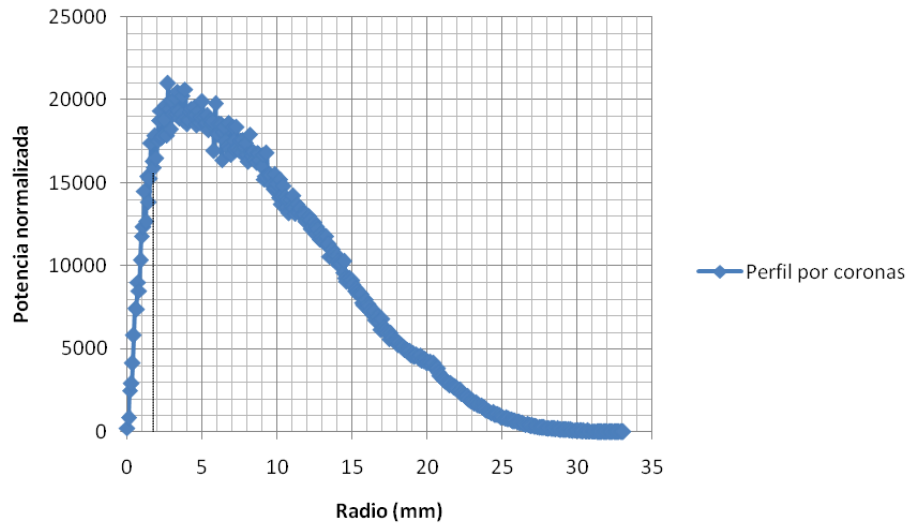


Figura 3.38 Perfil por coronas para una distancia del centro del espejo al foco de 177.8 mm.

Al igual que en apartados anteriores, la matriz de datos de intensidad de píxel puede representarse como  $Z(r, \varphi)$  en coordenadas cilíndricas. El perfil por coronas corresponde a la suma de la intensidad de los píxeles contenidos en una corona con un radio  $R$  determinado, es decir:

$$\text{Perfil por coronas } (R) = \sum_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} Z(r, \varphi)$$

Se puede observar como el spot no tiene potencia lumínica en su centro, es decir, tiene una especie de agujero con muy poca potencia luminosa de aproximadamente 2 mm de radio. Esto influye de manera muy negativa a la hora de intentar focalizar toda la luz en la parte activa de la célula. Ello requerirá el uso de elementos ópticos externos, como se explicará más adelante.

#### Distancia 192.8 mm

Para calcular el perfil de distribución a una distancia centro espejo-foco espejo de 192.8 mm se procede a realizar los pasos de manera similar a como se ha realizado para la distancia óptima.

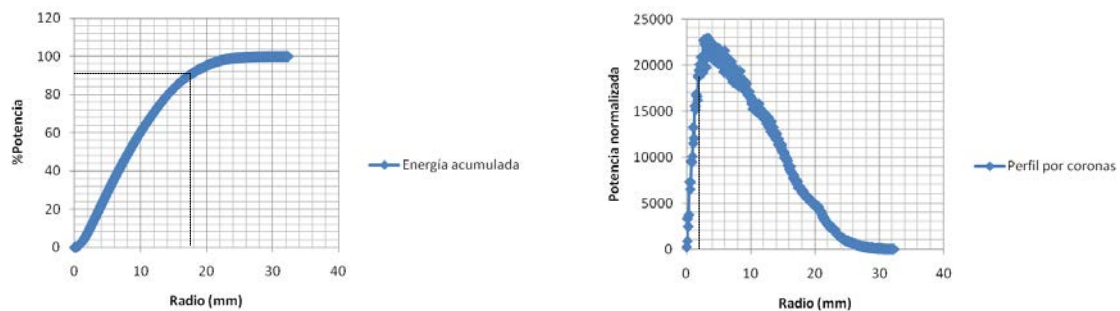
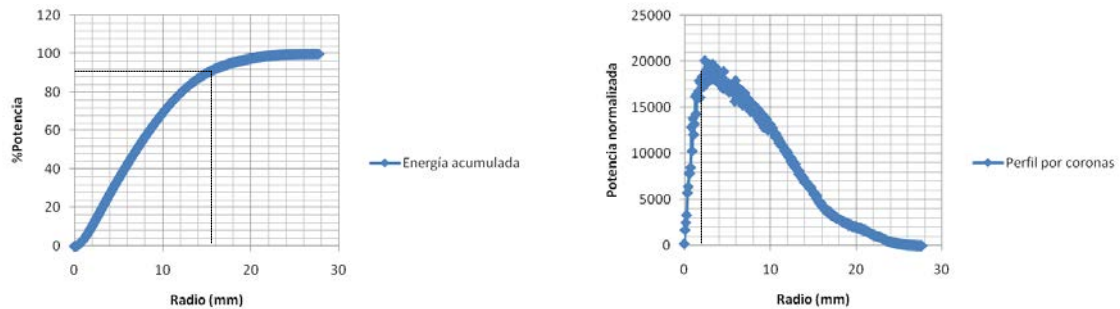


Figura 3.39 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: Perfil por coronas. Ambas para una distancia del centro del espejo al foco de 192.8 mm.

Se observan resultados muy similares a los obtenidos con la distancia óptima.

### **Distancia 162.8 mm**

Para este caso los resultados son los siguientes:



*Figura 3.40 Izquierda: Energía acumulada. Derecha: Perfil por coronas. Ambas para una distancia del centro del espejo al foco de 162.8 mm.*

Se obtiene un resultado un tanto mejor que en los dos apartados anteriores: el tamaño del spot tiene un radio menor en 2 mm.

### **Conclusiones**

La distancia entre el centro del espejo y cada célula no es muy restrictiva, se obtienen resultados similares con una variación de  $\pm 15$  mm. Cuando se coloquen nuevas células en la placa enfriadora, el operador deberá de ajustar esta posición para obtener los resultados óptimos.

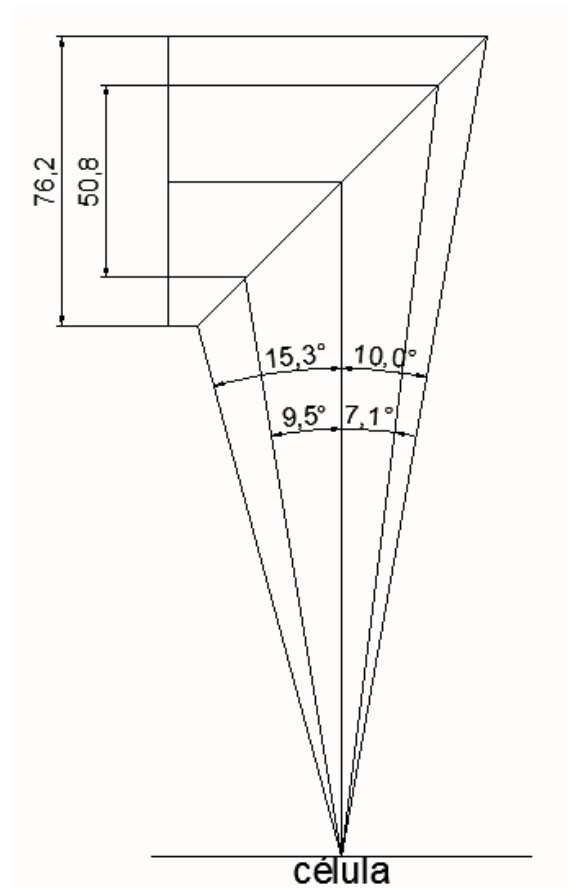
Las células que en un principio se van a testear tienen forma de cuadrado con unas dimensiones de 1 cm x 1cm , 5.5 mm x 5.5 mm y 3 mm x 3 mm.

De modo que atendiendo a los resultados anteriores se puede deducir con toda seguridad que si se quiere alcanzar la máxima concentración de luz en la parte activa de la célula, es necesario acoplarle algún tipo de elemento óptico secundario (SOE) que concentre el spot de 1.7 cm en el área activa de la célula correspondiente.

### **3.2.3.5 DISEÑO DEL ELEMENTO ÓPTICO SECUNDARIO**

#### **Inclinación de la estructura de fijación de la lámpara y del espejo fuera del eje**

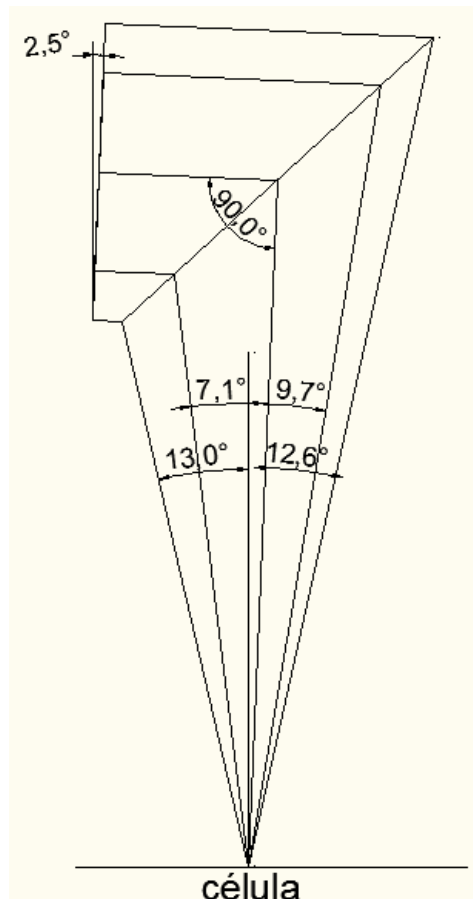
Con la disposición de los elementos ópticos anteriormente aclarada, los rayos llegarán con un cierto ángulo a la muestra.



*Figura 3.41 Muestra los ángulos de llegada de los rayos a la célula situada a 90° con respecto al centro del espejo.*

Puede observarse que en los extremos existe una diferencia de unos 5°. Mediante la inclinación de la estructura de fijación de la lámpara y del espejo fuera del eje se pretende que esta diferencia sea la menor posible y que se obtengan rayos con ángulos de llegada similares para ambos extremos. Además, en caso de utilizar SOE, la idea es la de centrar el cono de luz de llegada con el eje del propio SOE.

Por ello, se decide inclinar la estructura 2.5°, tal y como se ilustra en la siguiente figura:



*Figura 3.42 Representa los ángulos con los que llegarán los rayos de luz a la célula inclinando el espejo y la lámpara 2.5°.*

Se observa que estos son más parecidos entre sí que con la inclinación original.

Por otro lado, en el otro plano y como se ha indicado en un apartado anterior, los rayos llegan con un ángulo de aproximadamente  $16^\circ$ , lo que condiciona el diseño del secundario, que debe ser compuesto de un cono reflexivo truncado de vidrio que tenga en su entrada una inclinación similar.

### **Trazado de rayos**

Se procede a realizar una simulación en *LightTools* del trazado de rayos que, en teoría, se tendría para la disposición empleada y con la lámpara de arco de xenón como la utilizada en la máquina.

Se dibuja de manera aproximada la lámpara compuesta por un reflector parabólico (cuyos parámetros exactos se desconocen), una fuente emisora de luz correspondiente al arco de luz que se establece entre el cátodo y el ánodo y un cilindro coincidente con el eje de la parábola que representa al cátodo, que produce sombras.

La fuente emisora de luz es un cilindro de longitud 2.29 mm (tamaño especificado por el fabricante de la lámpara como longitud del arco) y diámetro 1mm.

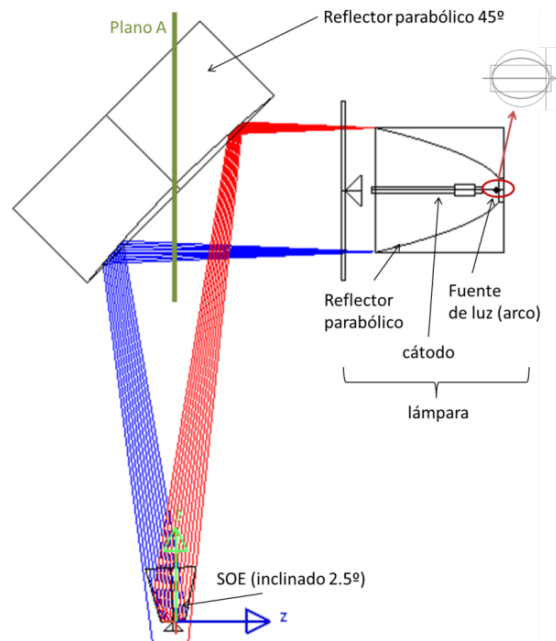


Figura 3.43 Esquema de simulación. En realidad el SOE no está inclinado 2.5°, sino que, como ya se conoce, es toda la estructura de la lámpara y espejo la que se inclina.

Se procede al ajuste de los parámetros de la lámpara para que la distribución de intensidad angular que se mide con un receptor que simula la cámara CCD (*Charge-Coupled Device*), con tamaño pequeño para simular el diafragma y colocado en la posición del centro del espejo, coincida con la medida experimental.

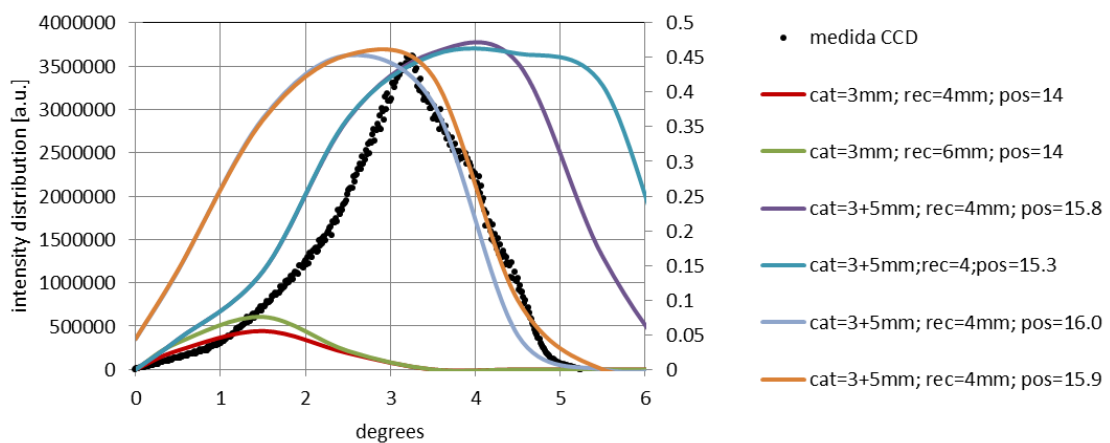


Figura 3.44 Distribución de intensidad angular para diferentes tamaños de cátodo, receptores y posición del cilindro.

De la anterior figura podemos sacar varias conclusiones:

- El tamaño del receptor (identificado como “rec” en la leyenda) no es muy crítico. Las curvas roja (diámetro de la cámara =4 mm) y verde (diámetro de la cámara=6mm) predicen resultados equivalentes.

- El tamaño del cilindro que sujeta al cátodo tiene una gran influencia como se observa al comparar las curvas roja y verde (cilindro del cátodo=3 mm) con el resto (cilindro del cátodo =5 mm).
- Por último, el aspecto más crítico es la posición de la fuente cilíndrica que representa el arco de luz, ya que es necesario ajustarlo con una precisión de 0.1mm para que el pico de irradiancia ocurra con el mismo ángulo de incidencia que se ha medido experimentalmente. La curva naranja (posición del cilindro de luz= 15.9mm) es la que mejor reproduce la medida experimental.

### Diseño del SOE

Teniendo en cuenta el cono de luz que ve la célula debajo del reflector parabólico se diseña un secundario con forma cónica clásico (en el sentido de que toda la luz que llega a la entrada del SOE es reflejada y llega a la célula). Posteriormente, las paredes de ese cono se hacen más grandes (manteniendo el ángulo de las paredes) para intentar recoger más luz. Esta extensión de paredes es, en cierto modo ineficiente, ya que refleja parte de la luz hacia la célula pero “rebota” otra parte de la luz hacia arriba.

En primer lugar se diseñan los secundarios cónicos clásicos para una salida de 3mm, 5.5mm y 10mm. La salida de 3 mm coincide con el lado de los tipos de células que se van a medir en primer lugar de forma experimental. El semiángulo del cono para todos los casos tiene que ser 13.75°.

En segundo lugar se “agrandan” estos conos de luz.

Cada uno de ellos se simula con *LightTools* con el sistema de lámpara y espejo reflector descrito previamente. Cada simulación consta de 5 millones de rayos y se define la eficiencia como el ratio entre la cantidad de luz que llega a la célula dividida entra la cantidad de luz que sale de la lámpara.

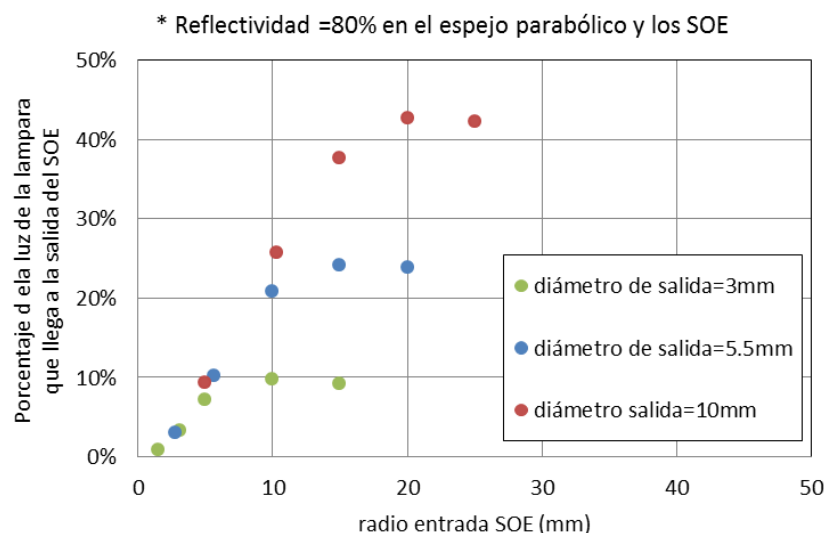


Figura 3.45 Gráfica que muestra el porcentaje de la luz de la lámpara que llega a la salida del SOE con respecto al radio de entrada del SOE

En todos los casos de la anterior figura se llega a una asíntota que indica que no merece la pena aumentar más la entrada del SOE “porque no se gana nada”.

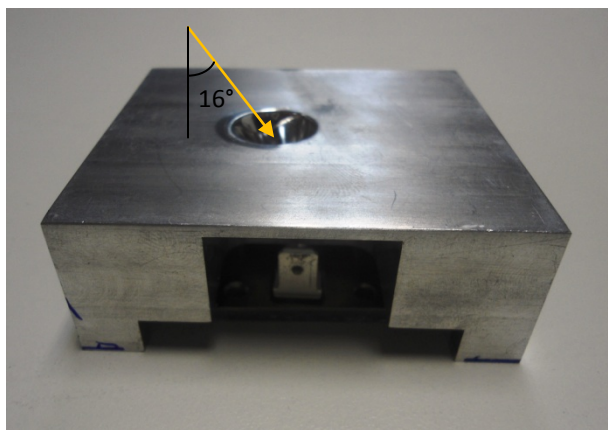
Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente las dimensiones de los SOEs serían.

- Para la célula de 3 mm: altura=14.3 ; radio a la entrada=5
- Para la célula de 5.5x5.5 mm: altura=29.63 ; radio a la entrada= 10
- Para la célula de 10 mm: altura=40.87 ; radio a la entrada= 15

Estas dimensiones se han decidido teniendo como criterio maximizar la luz que llega a la célula pero también implica que parte de la luz que entra al SOE rebota y sale “hacia arriba”, con las consiguientes molestias para el usuario y la posibilidad de que otras zonas se calienten más.

Las únicas pruebas experimentales que se han realizado hasta ahora son para la célula de 3 mm. Para ello es necesario realizar una pieza que enmascare de manera correcta las conexiones del receptor de la célula para que la luz con alta irradiancia no produzca ningún daño a estas, ya que correría el peligro de quemarse. A su vez esta pieza debe de tener un hueco cónico con las propiedades anteriormente descritas, como puede observarse en la siguiente figura.

La pieza diseñada queda entonces de la siguiente manera:



*Figura 3.46 Fotografía del secundario asociado al tipo de célula para las pruebas experimentales*

El cono tiene las características descritas para la célula de 3 mm de lado con una inclinación de 16° en una de sus paredes para recoger el mayor número de rayos.

## 3.2 MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA

### 3.2.1 INTRODUCCIÓN

Tal y como se ha especificado con anterioridad este módulo está compuesto por la placa enfriadora que es la encargada de mantener la base de las células a una temperatura específica en cada momento.

Para que esto sea posible este tipo de dispositivos se basan en el efecto *Peltier*.

### 3.2.2 EFECTO PELTIER

El efecto *Peltier* consiste en la creación de una diferencia térmica a partir de una diferencia de potencial eléctrico. Ocurre cuando una corriente pasa a través de dos metales diferentes o semiconductores (tipo n y tipo p) que están conectados entre sí mediante dos soldaduras o uniones *Peltier*. La corriente produce una transferencia de calor desde una unión que se enfría, hasta la otra que se calienta.



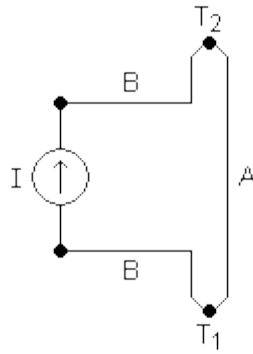


Figura 3.47 Circuito que muestra el efecto Peltier

Un efecto interesante es que al invertir su polaridad se invierte también su funcionamiento; es decir: la superficie que antes generaba frío empieza a generar calor, y la que generaba calor empieza a generar frío.

El fenómeno se aprovecha a través de las llamadas células *Peltier*: alimentando una de éstas, se establece una diferencia de temperatura entre sus dos caras. Esta diferencia depende de la temperatura ambiente donde está situada dicha célula, y del cuerpo que se quiera enfriar o calentar.

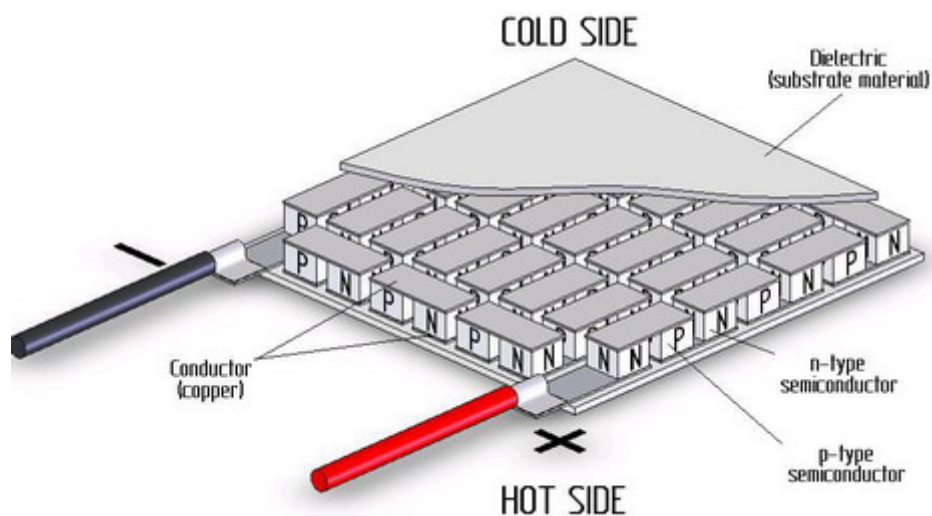


Figura 3.48 Representación de un módulo Peltier.

Se puede observar que una célula *Peltier* se compone, en esencia, de dos materiales semiconductores, uno con canal N y otro con canal P, unidos entre sí por una lámina de cobre.

Si en el lado del material N se aplica la polaridad positiva de alimentación y en el lado del material P la negativa, la placa de cobre de la parte superior se enfría, mientras que la inferior calienta. Si en esta misma célula, se invierte la polaridad de alimentación, es decir, se aplica en el lado del material N la polaridad negativa y en el lado del material P la positiva, se invierte la función del calor/frío: la parte superior calienta y la inferior enfría.

Físicamente los elementos de un módulo *Peltier* son bloques de  $1 \text{ mm}^3$  conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, como se puede observar en la figura anterior.

Este tipo de módulos tienen mayor o menor eficiencia dependiendo de la alimentación requerida, ya que no todos necesitan la misma tensión ni corriente. Cada fabricante es el encargado de indicar estos parámetros.

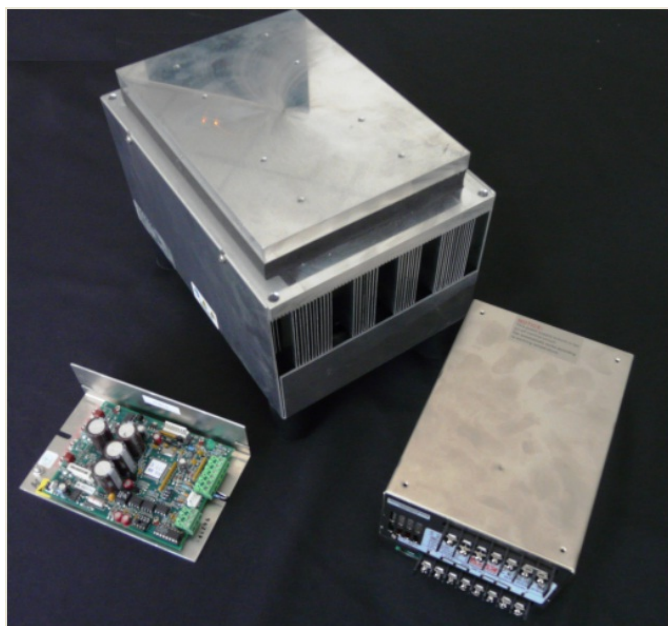
Teniendo en cuenta sus reducidas dimensiones, una sola célula puede alcanzar, en teoría, como máximo una potencia frigorífica de 0,5 W. Para conseguir potencias frigoríficas de 15 a 20 W es necesario realizar baterías formadas por 30 o 40 células. En resumen, tanto la dimensión como la potencia calorífica obtenida dependen del número de elementos utilizados por módulo.

---

### 3.2.3 MODELO ESCOGIDO

Según la normativa IEC 62108 la temperatura mínima de ciclado es de  $-10^{\circ}\text{C}$  y la máxima a  $110^{\circ}\text{C}$ . Después de realizar un estudio exhaustivo de los diferentes tipos de placas que existen hoy en día en el mercado se llega a la conclusión de que es realmente complicado encontrar una placa enfriadora que consiga llegar a esa temperatura mínima cuando tiene que remover 250 W de calor procedente de la lámpara. Otro detalle a tener en cuenta es que las dimensiones de la placa han de permitir que se puedan separar las muestras unos 10 cm.

Con todo esto el modelo finalmente escogido es el CP-200HT-TT de *TE Technology, Inc*



*Figura 3.49 Fotografía de la placa enfriadora CP-200HT-TT junto a su fuente de alimentación y controlador*

Tiene las siguientes características:

- Lámina de aluminio de 215.9 mm x 152.4 mm y de 12.4 mm de grosor.
- De la gráfica de rendimiento de la placa enfriadora se observa que si ésta tuviera que remover los 250 W de calor procedentes de la lámpara, solo podría enfriar hasta una temperatura mínima de aproximadamente la temperatura ambiente más unos  $10^{\circ}\text{C}$ . Teniendo en cuenta que la fuente de luz sólo va a afectar a una pequeña parte de la placa y que, además, se intentará evitar que la lámpara trabaje a potencia máxima, se puede asumir que se obtendrán mejores resultados que los esperados teóricamente y se lograrán alcanzar temperaturas mínimas de menor valor.

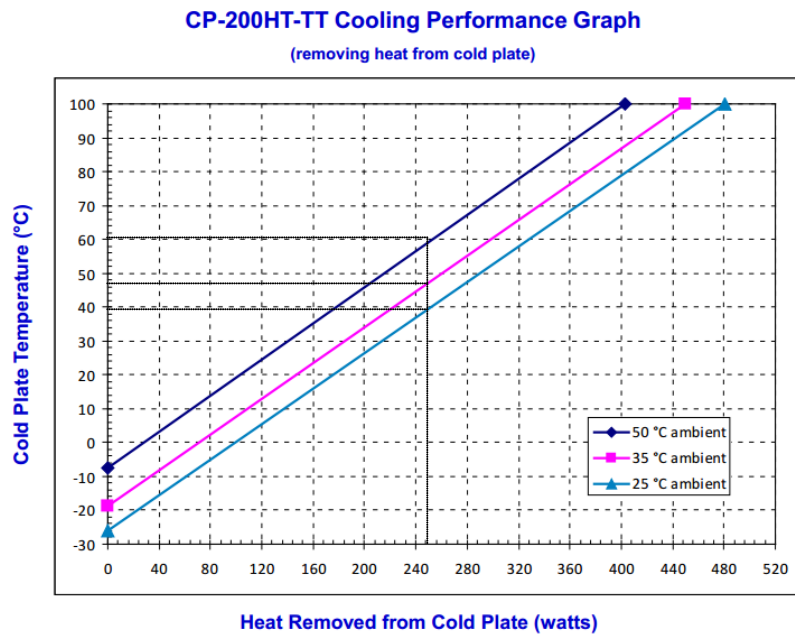


Figura 3.50 Gráfica de rendimiento de la placa enfriadora

Una vez seleccionada la placa enfriadora se debe de elegir un controlador de temperatura que sea bidireccional (con puente en H), es decir, que sea capaz de enviar las ordenes necesarias a la placa para que ésta sea capaz de enfriar y calentar. Además, debe de tener una interfaz compatible con el software de programación que se va a utilizar, *LabVIEW*. Este controlador es el modelo *TC-36-25-RS232* diseñado por el propio fabricante de la placa enfriadora y cuyas características se detallarán dentro del apartado 3.3.

### 3.2.3.1 LÁMINA DE ALUMINIO ACOPLADA

Para poder manipular la lámina de aluminio que viene de fábrica en la placa enfriadora y que ésta no sufra ningún daño, se le acopla otra atornillada en los propios agujeros roscados que incluye. Para que haya un buen contacto térmico se unta grasa térmica en la pared que va a estar en contacto.

La lámina que se le acople a la placa enfriadora debe de tener una resistencia térmica muy baja para que ésta no perjudique la transferencia de calor desde la lámina en contacto con los módulos *Peltier* (lámina de fábrica) hasta la base de la célula.

La transferencia de calor se produce de la siguiente manera:

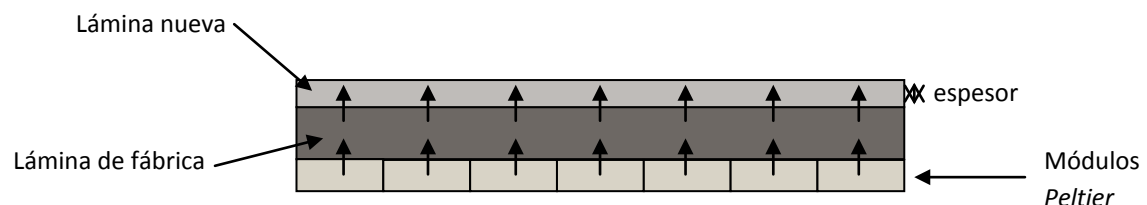
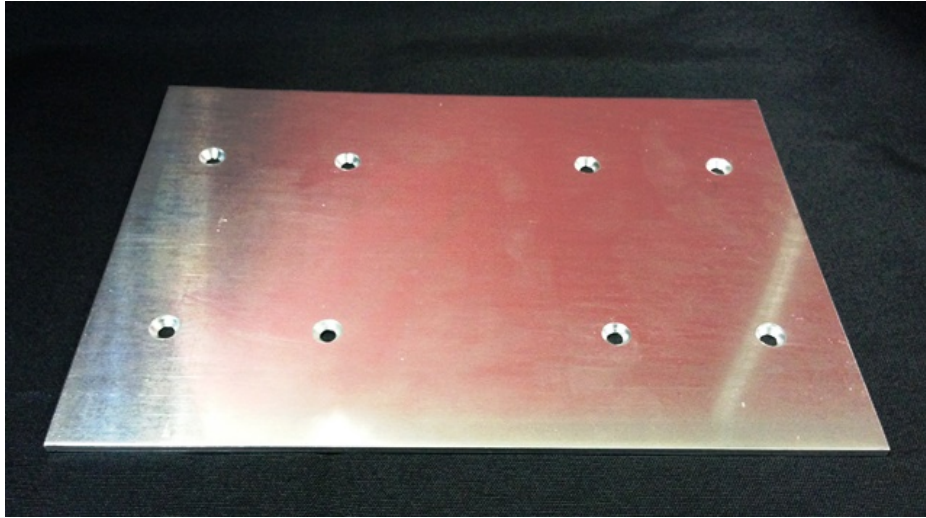


Figura 3.51 Recorrido de la transferencia de calor desde los módulos Peltier hasta la lámina nueva a acoplar

Se decide acoplar una lámina nueva de aluminio con espesor de 3 mm, que es un grosor suficiente para poder manipularla sin dañar la de fábrica. Las otras dimensiones son iguales a la de la lámina de fábrica, es decir, de 215.9 mm x 152.4 mm.



*Figura 3.52 Fotografía de la lámina acoplada a la que viene de fábrica en la placa enfriadora*

Es necesario calcular la resistencia térmica de dicha lámina para asegurar que se tiene una transferencia de calor óptima.

La resistencia térmica se define de la siguiente manera:

$$R_{th} \left( \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}} \right) = \frac{L(\text{m})}{k \left( \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}} \right)}$$

donde

$$\begin{cases} L = \text{grosor de la lámina} \\ k = \text{conductividad térmica del material} \end{cases}$$

La conductividad térmica del aluminio es de  $k = 209.3 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}}$  y el grosor de la placa es de  $L = 3 \text{ mm}$

Entonces

$$R_{th\_lámina} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{209.3 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}}} = 1.433 \cdot 10^{-5} \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}$$

Para calcular la resistencia térmica absoluta hay que dividir esta resistencia térmica calculada por el área de la lámina a acoplar que se encuentra en contacto con la lámina de fábrica. Entonces,

$$R_{th\_placa\_absoluta} \left( \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \right) = R_{th\_placa} \cdot A_{placa} = \frac{1.433 \cdot 10^{-5} \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2}{\text{W}}}{0.2159 \text{ m} \cdot 0.1524 \text{ m}} = 0.00044 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

La resistencia térmica absoluta de la lámina es prácticamente nula, con lo que se puede asegurar una transferencia de calor óptima.

Para que el contacto térmico entre láminas sea lo más alto posible se extiende pasta térmica de óxido metálico (con conductividad de  $0.65 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}}$ ) en la cara de la lámina que coincide con la lámina de fábrica.

## 3.3 MÓDULO DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

### 3.3.1 INTRODUCCIÓN

El módulo de control y adquisición de datos va a ser el encargado de realizar todas las tareas de control de los dispositivos anteriormente mencionados, así como de adquirir datos como por ejemplo, los de las medidas de las curvas IV en oscuridad. Este es el módulo más importante de todos ya que todos los dispositivos deben de estar perfectamente sincronizados para poder realizar de forma correcta el tipo de ciclo diseñado, aunque esto se verá con más detalle en el siguiente capítulo en el cual se explicará el comportamiento del software y los procedimientos de programación.

En resumen, este módulo consta de los siguientes elementos:

- *CompactDAQ* : compuesto por un módulo de medida de temperatura, medida de tensión, salida de tensión y un módulo de salidas y entradas digitales.
- Controlador del actuador lineal: encargado de enviar las órdenes necesarias al actuador para que éste se mueva a la posición deseada, así como obtener realimentación sobre su posición actual.
- Controlador de la placa enfriadora (*Cold Plate*): mediante software, permite controlar la temperatura consigna encargándose de enviar las órdenes necesarias a la fuente de alimentación para que ésta inyecte mayor o menor potencia a los módulos *Peltier*.
- Circuito de medida de curva IV en oscuridad: incluye la fuente de carga para la medida de la curva, relés de selección de canales y células, adaptadores de señal etc.
- Fuente de alimentación programable de la lámpara de arco de xenón.
- Ordenador personal para el control.

Se procede ahora a explicar con más detalle la función de cada una de las partes que componen este módulo.

### 3.3.2 COMPACT DAQ

#### 3.3.2.1 CHASIS NI COMPACT DAQ 9174

El *NI cDAQ-9174* es un chasis *NI CompactDAQ* USB de cuatro ranuras diseñado para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas. Se pueden conectar hasta cuatro módulos compatibles dentro de una variedad de sensores incluyendo termopares, RTDs (*Resistance Temperature Detector*), acelerómetros, medidores de flujo etc. Estos sistemas combinan medidas de sensores con señales de voltaje, corriente y digital para crear sistemas personalizados de señal mixta con un solo cable USB al ordenador.



Figura 3.53 Chasis NI cDAQ-9174

### 3.3.2.2 NI 9211

El módulo NI 9211 permite la adquisición de datos de temperatura mediante termopares, permitiendo conectar y medir simultáneamente hasta cuatro de ellos. El esquema de terminales es el siguiente:

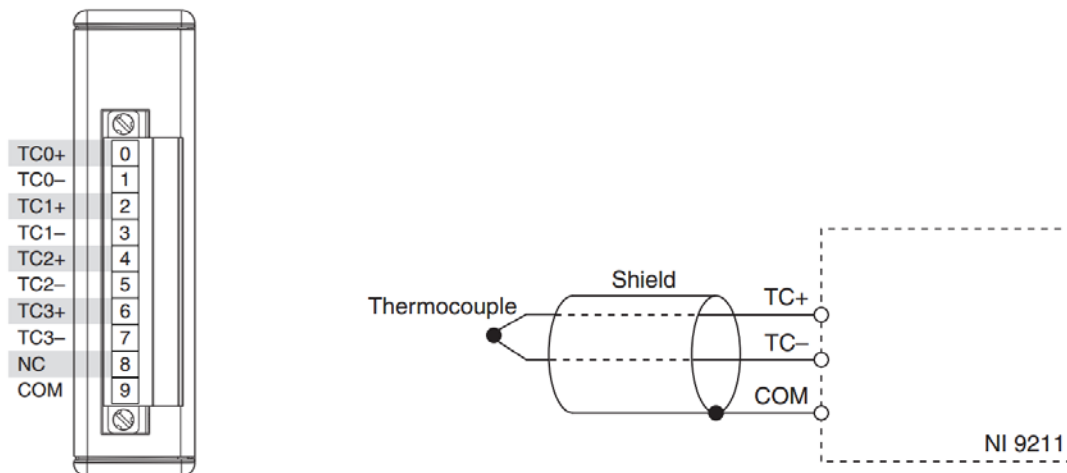


Figura 3.54 Esquema de terminales y conexiones del NI 9211

Se pueden conectar señales de entrada de termopar al NI 9211. Como se aprecia en la figura anterior, se debe de conectar el cable positivo a TC+ y el negativo a TC-. COM es la referencia de tierra, que es compartida por todos los módulos del sistema. Cada canal pasa a través de un filtro y después a través de un convertidor analógico-digital de 24 bits, que convierte las muestras de cada canal.

Cada canal tiene también un circuito de detección de termopares, que consiste en una fuente de corriente entre TC+ y TC-. Si se conecta un termopar al canal, la fuente de corriente fuerza un voltaje a escala completa a través de los terminales.

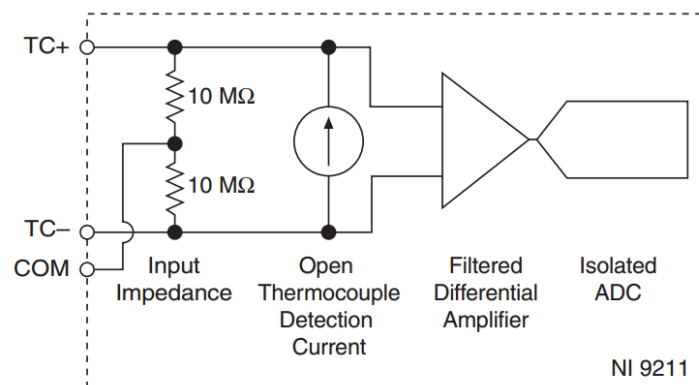


Figura 3.55 Circuito de entrada del NI 9211

Se observa cómo, además de lo mencionado anteriormente, que cada canal tiene una resistencia que produce una cierta impedancia de entrada entre  $TC+$  y  $COM$  y entre  $TC-$  y  $COM$ . La ganancia y los errores de offset resultantes de la impedancia de los termopares conectados son insignificantes para la mayoría de aplicaciones.

En la máquina LYSS se van a emplear 4 termopares tipo K, que serán distribuidos a gusto del operador que esté utilizando en ese momento la máquina. Este tipo de termopares tienen un alto rango de temperatura, de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una sensibilidad de  $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  aproximadamente.

Es aconsejable posicionar al menos uno de ellos en la carcasa de la lámpara, cerca del bimetálico de protección, para tener constancia en todo momento de la temperatura de la lámpara.

### 3.3.2.3 NI 9215

El módulo *NI 9215* permite la adquisición de datos de tensión, permitiendo conectar y medir simultáneamente hasta cuatro de ellos. El esquema de terminales es el siguiente:

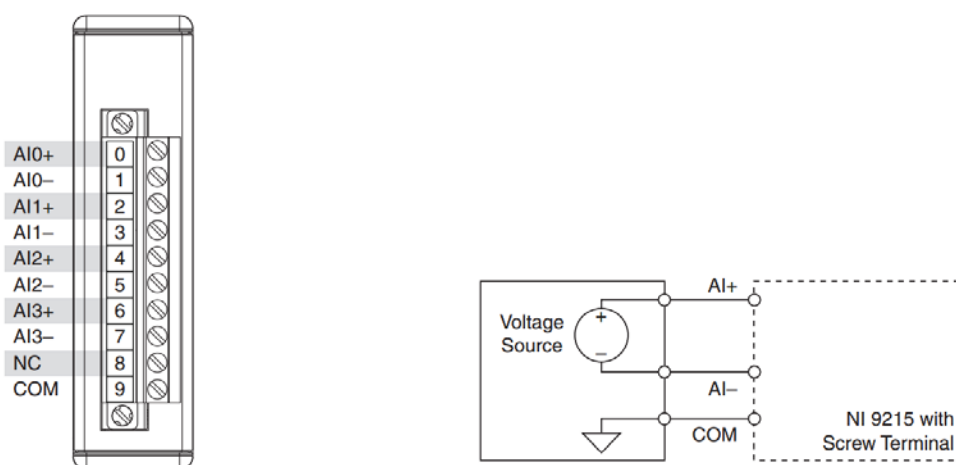


Figura 3.56 Esquema de terminales y conexiones del NI 9215

Similaramente al módulo *NI 9211* se debe de conectar el contacto positivo a  $AI+$  y el negativo a  $AI-$ . Al igual que el módulo explicado anteriormente, incluye la referencia a tierra  $COM$ .

Estos terminales de entrada de tensión van a ser utilizados en la máquina LYSS para realizar funciones de medida de la curva IV de las dos células. Dos de estas entradas serán utilizadas para medir la tensión que proporciona cada célula en el proceso de medida de la curva (que será explicado más adelante) y para medir la corriente generada por ésta para cada uno de los canales de medida, pasando antes por un circuito adaptador que se encargará de transformar esta corriente en una tensión legible para el módulo.

#### 3.3.2.4 NI 9375

El módulo NI 9375 se compone de 16 entradas y 16 salidas digitales que pueden ser ejecutadas simultáneamente con ayuda de una fuente externa. La conexión se realiza con un cable D-SUB (D-SUBminiature) de 37 pines.

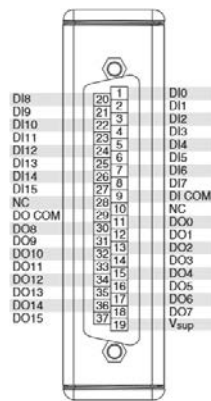


Figura 3.57 Esquema de terminales del módulo NI 9375

En este caso, se tienen dos esquemas diferentes de conexiones, uno para la entrada y otro para la salida digital.



Figura 3.58 Izquierda: esquema de conexiones de entradas digitales. Derecha: esquema de conexiones de salidas digitales

La entrada digital se basa simplemente en leer la señal digital proveniente de una fuente externa. Si ésta provee una señal de más de 5 V, el dispositivo detectará un "1". Si es menor, detectará un "0".

Para producir señales digitales de salida este módulo genera una señal con valor de tensión igual a la de la fuente externa que se conecte al terminal  $V_{sup}$ , como puede verse en la figura anterior. Este nivel de tensión equivaldría a una señal digital de salida con nivel alto.

Ambas señales de entrada y salida deben de estar correctamente referenciadas usando el terminal DI/DO COM.

Este módulo permite utilizar fuentes externas de entre 6 V y 30 V para generar las señales de salida a nivel alto. Además, permite leer señales de entrada de hasta 30 V.



En la máquina LYSS el NI 9375 juega un papel muy importante, ya que será el encargado de controlar diversos relés de 24 V y de leer la señal de estado de la lámpara. Para ello, en la entrada  $V_{sup}$  del módulo se conecta una fuente de tensión constante de 24 V que sea capaz de activar dichos relés.

### 3.3.2.5 NI 9263

Este módulo se compone de cuatro canales de salida analógica:

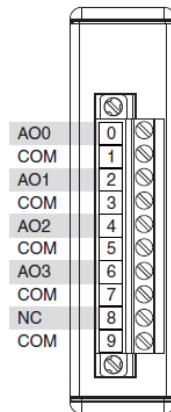


Figura 3.59 Esquema de terminales del módulo NI 9263

Cada canal se compone de una salida positiva (AOX) y de una referencia a tierra COM. Para conectar una carga a la salida hay que realizar las conexiones del esquema siguiente:

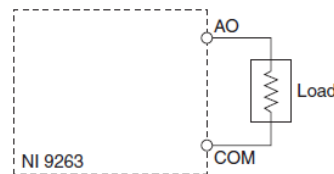


Figura 3.60 Esquema de conexiones para conectar una carga a un canal del módulo NI 9263

En la máquina LYSS este módulo es utilizado para programar la potencia de salida de la fuente de alimentación de la lámpara de arco de xenón y para programar la fuente que entra en juego a la hora de realizar la medida de la curva IV en oscuridad de cada célula.

### 3.3.3 CONTROLADOR DEL ACTUADOR LINEAL

Como se sabe de apartados anteriores, se escoge un actuador lineal con 50 mm de longitud de brazo para hacer posible el movimiento del espejo y, por ende, el del spot de luz.

El actuador escogido es el L12-50-100-6-P del fabricante *Firgelli Technologies* y tiene las siguientes características:

- Longitud del brazo : 50 mm
- Relación de transmisión de los engranajes : 100
- Voltaje : 6 V
- Controlador: tipo P, es decir, no tiene controlador integrado .

Además, con la relación de transmisión escogida es capaz de desplazar una carga de hasta 80 Newtons, lo que es más que suficiente para desplazar la biela de aluminio diseñada para realizar el giro.

Para que el movimiento del actuador pueda hacerse efectivo, es necesaria la ayuda de un controlador con conexión USB y que sea controlable por ordenador mediante *LabVIEW*. Estas características las cumple el controlador *LAC - Firgelli Linear Actuator Control Board* que es totalmente compatible con el actuador lineal en cuestión y dispone de librerías *LabVIEW*.

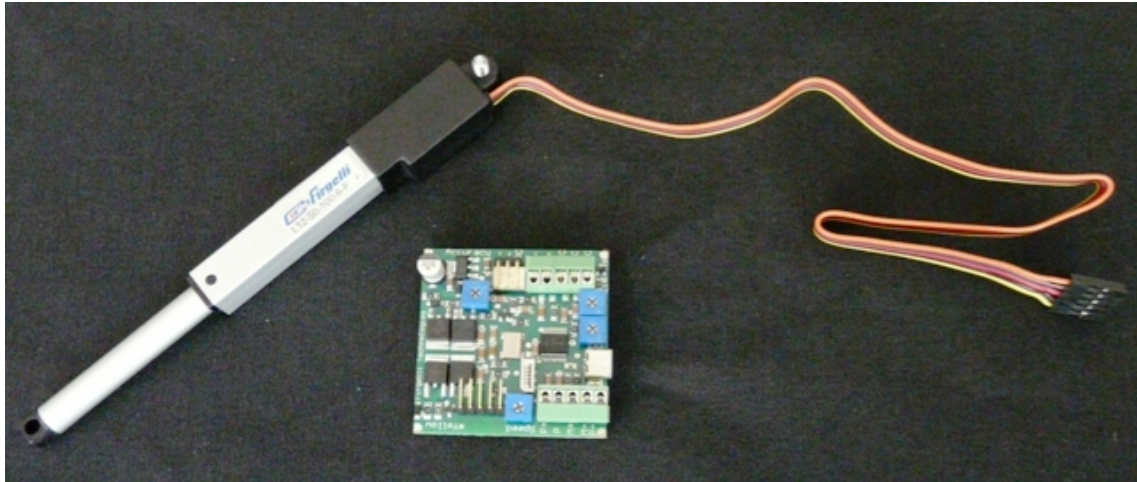


Figura 3.61 Actuador lineal adquirido junto con el controlador compatible.

El controlador del actuador lineal posee una serie de comandos que son transmitidos al actuador. Éstos pueden ser ejecutados mediante los VIs (Instrumentos virtuales) que están diseñados por el propio fabricante para tales propósitos.

A continuación, un breve resumen de los parámetros que se van a modificar a lo largo de la ejecución del programa de control de la máquina:

- *SET\_ACCURACY*: mediante el parámetro *Valor* (con rango de valores entre 0-1023) se modifica la precisión del actuador atendiendo a la siguiente fórmula:

$$\text{Precisión} = \frac{\text{Valor}}{1024} \times \text{Longitud\_brazo\_actuador}$$

El parámetro modificable mediante software es *Valor*, que en el caso de la máquina LYSS siempre tiene el valor 1, lo que quiere decir que la precisión es:

$$\text{Precisión} = \frac{1}{1024} \times 50 = \pm 0,05 \text{ mm}$$

Se requiere una precisión muy alta para este dispositivo ya que cualquier variación en la posición del actuador supondría una variación del haz, lo que podría suponer una gran pérdida de potencia concentrada en la célula.

- *SET\_VELOCITY*: controla la velocidad de movimiento del actuador mediante un porcentaje que en este caso tiene el valor constante de 100, lo que significa que estará toda la ejecución a velocidad máxima.

Con esta configuración, el tiempo que el actuador lineal se toma para ir de la posición de mínima extensión a la máxima es de unos 5 segundos que habrá que tener en cuenta a la hora de realizar la configuración de los ciclos de luz.

- *SET\_POSITION*: comando que fija la posición a la que se quiere mover el actuador dentro del rango correspondiente a la longitud del brazo de éste.
- *GET\_FEEDBACK*: comando que devuelve la posición actual del actuador lineal medida gracias al potenciómetro de realimentación que contiene el propio actuador.

Será necesario configurar las posiciones correspondientes de cada célula a testear en el programa de control.

---

### 3.3.4 CONTROLADOR DE LA PLACA ENFRIADORA

El mismo fabricante la placa enfriadora ofrece un controlador de temperatura acorde con las exigencias del dispositivo, se trata del *TC-36-25-RS232* y sus principales características son:

- Bidireccional, configuración en puente-H para calentamiento y enfriamiento.
- Temperatura de control entre -20 °C a 100 °C, con el termistor que se incluye de fábrica MP-3193, que es un termistor de 15 kΩ.
- Control PID que, entre otras características, permite mantener de forma eficiente la temperatura especificada en cada momento.
- Interfaz RS232. Se adquiere un adaptador RS232-USB para conectarse vía PC.
- Totalmente compatible con *LabVIEW* incluyendo un programa de ejemplo y varios subVIs de configuración.

El controlador es capaz de llegar a la temperatura consigna en cada momento atendiendo a diferentes tipos de mecanismos de control dependiendo del ciclo que se va a realizar.

En primer lugar, es necesario explicar los diferentes mecanismos de control que puede manejar el controlador.

- *DEADBAND CONTROL (ON/OFF)*

Este mecanismo de control se basa en encender y apagar la placa ya sea por un aumento o caída de temperatura donde no se lleva a cabo ningún mecanismo de calentamiento o enfriamiento. Este mecanismo está totalmente desaconsejado por el fabricante a menos que tenga especial cuidado para evitar que la placa sufra daños debido a un ciclado térmico excesivo.

- *PID CONTROL*

Selecciona el modo de control proporcional/integral/derivativo. Cuando se selecciona este modo, el controlador de temperatura compara la temperatura actual con la temperatura consigna y automáticamente ajusta la potencia de salida en consecuencia. Esta potencia de salida será de un valor u otro atendiendo a la configuración específica de los componentes proporcional, integral y derivativo.

#### **Ancho de banda proporcional**

Los valores de ancho de banda proporcional aceptados deben de estar dentro del rango de 1 °C a 100 °C. Este ancho de banda es el rango de temperatura sobre el cual la potencia de salida varía proporcionalmente desde el -100% al 100%. Este ancho de banda está centrado sobre la temperatura

consigna en ese momento, y, una vez establecida, éste variará la potencia de salida de forma proporcional a medida que la temperatura actual entra dentro de su rango de temperaturas. Es decir, la potencia de salida es del +100% al final del rango del ancho de banda por encima del punto de temperatura consigna, va decreciendo hasta el 0% de potencia a medida que se va alcanzando este punto de temperatura, y entonces, una vez que lo alcanza, se invierte la potencia (caliente) y llega al -100% proporcionalmente a medida que va alcanzando el final del rango del ancho de banda por debajo de dicho punto consigna.

Por ejemplo, suponiendo que el controlador está funcionando en modo de enfriamiento, el punto consigna es de 10 °C, y el ancho de banda proporcional está fijado en 5 °C con los demás parámetros del PID puestos a cero. El controlador estará al 100% de salida hasta que la temperatura alcance los 12.5 °C. La potencia entonces empieza a decrecer proporcionalmente a medida que el sensor de temperatura se enfría por debajo de los 12.5 °C, se irá reduciendo de esta manera hasta llegar al 0% en 10 °C. Finalmente, la potencia se invertirá de polaridad y proporcionalmente aumentará hasta -100% si el sensor de temperatura decrece hasta 7.5 °C.

Hay que tener en cuenta que si el ancho de banda proporcional es estrecho, la temperatura oscilará sobre el punto de consigna. Por otro lado, si es muy ancho, el controlador responderá lentamente o nunca alcanzará el punto de consigna.

### **Ganancia integral**

Los valores aceptados de ganancia integral deben de estar contenidos en el rango de 0 a 10 repeticiones por minuto.

Con solamente control proporcional, la salida del controlador es, por definición, 0% cuando la temperatura actual alcanza la temperatura consigna. Debido a que siempre se requiere algún nivel de potencia de salida diferente de cero para alcanzar el punto consigna, usar solo control proporcional no permite que el controlador mantenga la temperatura consigna deseada. Sin embargo, introduciendo una ganancia integral permite tener una salida diferente del 0% cuando la temperatura actual alcanza la consigna. Ésta, en esencia, cambia la potencia de salida al nivel medio requerido para mantener el punto de consigna deseado.

Por ejemplo, suponiendo que el punto de consigna es de 10 °C, el ancho de banda proporcional está fijado en 5 °C y la placa se encuentra a una temperatura constante de 11.2 °C (que corresponde al 48% de la potencia con solo el ancho de banda proporcional activo).

- En este caso el "error" es de 1.2 °C, que es la diferencia entre la temperatura actual y la consigna.
- Del anterior ejemplo se sabe que la salida proporcional cambiará un 40% por cada °C de cambio en el error (100%/2.5°C).
- Se asume que la ganancia integral está activada con valor de 1 repetición/minuto.

La función integral realizará ahora una rampa con la potencia de salida con una tasa determinada por la señal de error, el ancho de banda proporcional y la ganancia integral. La tasa se determina multiplicando el error, la ganancia del ancho de banda y la ganancia integral. En este caso, con los datos anteriores se tiene que el controlador incrementará la salida de potencia con una tasa del 48% por minuto, esto es:

$$\frac{40\%}{^{\circ}\text{C}} \cdot 1,2^{\circ}\text{C} \cdot \frac{1}{\text{minuto}} = 48 \frac{\%}{\text{minuto}}$$

La salida se actualiza continuamente entre el +100% y el -100%.

En este caso, si la ganancia integral es muy alta, la temperatura oscilará. Sin embargo, si es muy baja, pasará mucho tiempo para que la temperatura se estabilice.

### **Ganancia derivativa**

Los valores deben de estar dentro del rango de 0 a 10 ciclos por minuto.

La ganancia derivativa detecta la tasa de cambio de temperatura y permite que el controlador anticipe la potencia necesaria para compensar cambios rápidos en el sistema. Este componente se usa generalmente para sistemas muy lentos o cuando se necesita una respuesta muy rápida. Funciona de manera similar a la ganancia integral, pero actúa sobre un cambio en la señal de error y no en la señal de error real.

- **COMPUTER CONTROL**

Permite que el ordenador conectado pueda ajustar la potencia de salida manualmente. Hay 511 valores discretos de potencia de salida en cada modo (enfriamiento o calentamiento).

De la misma manera que el controlador del actuador lineal, el fabricante dispone de varias funciones de configuración para ser utilizadas con *LabVIEW*. Todo esto se explicará con más detalle en el capítulo dedicado al software.

A continuación se presenta un resumen de los comandos más importantes que se van a utilizar en el programa de control de la máquina:

- *FIXED DESIRED CONTROL SETTING*: en escritura y con control PID, envía el valor de temperatura consigna que se desee en ese momento.
- *HEAT MULTIPLIER*: es un multiplicador numérico con rango entre 0 y 2 cuya función es compensar la respuesta no simétrica entre el modo de calentamiento y enfriamiento de la placa termoeléctrica. Cuando el controlador está en modo calentamiento toma la salida de potencia que indica el PID y multiplica su valor para obtener la potencia de salida real. Si se pone a 0, entraría en el modo de solo enfriamiento.
- *COLD MULTIPLIER*: tiene el mismo comportamiento que el anterior pero tiene efecto cuando el controlador se encuentra en modo de enfriamiento.
- *PROPORTIONAL BANDWIDTH, INTEGRAL GAIN, DERIVATIVE GAIN*
- *CONTROL TYPE* : permite seleccionar el tipo de control a utilizar de entre los explicados anteriormente.

Los demás parámetros tienen el valor que viene por defecto en el controlador, como por ejemplo el tipo de sensor, alarma etc.

---

## **3.3.5 MEDIDA CURVA IV EN OSCURIDAD**

### **3.3.5.1 INTRODUCCIÓN**

---

El sistema debe de ser capaz de medir y almacenar secuencialmente las curvas IV en oscuridad de dos células. Para ello, entre otras cosas, hay que asegurar que no existe contacto eléctrico entre las dos células que estarán situadas en la placa enfriadora. Además, se debe de realizar un diseño que sea lo más sencillo posible y que no requiera de demasiados dispositivos externos, como fuentes de alimentación y relés.

En principio esta máquina permite testear cualquier tipo y tamaño de célula, es por eso por lo que se establecen 2 canales de medida: uno de hasta 2 A y otro de hasta 10 A. Para cada canal se tendrá un cableado específico.

### 3.3.5.2 CIRCUITO DE MEDIDA

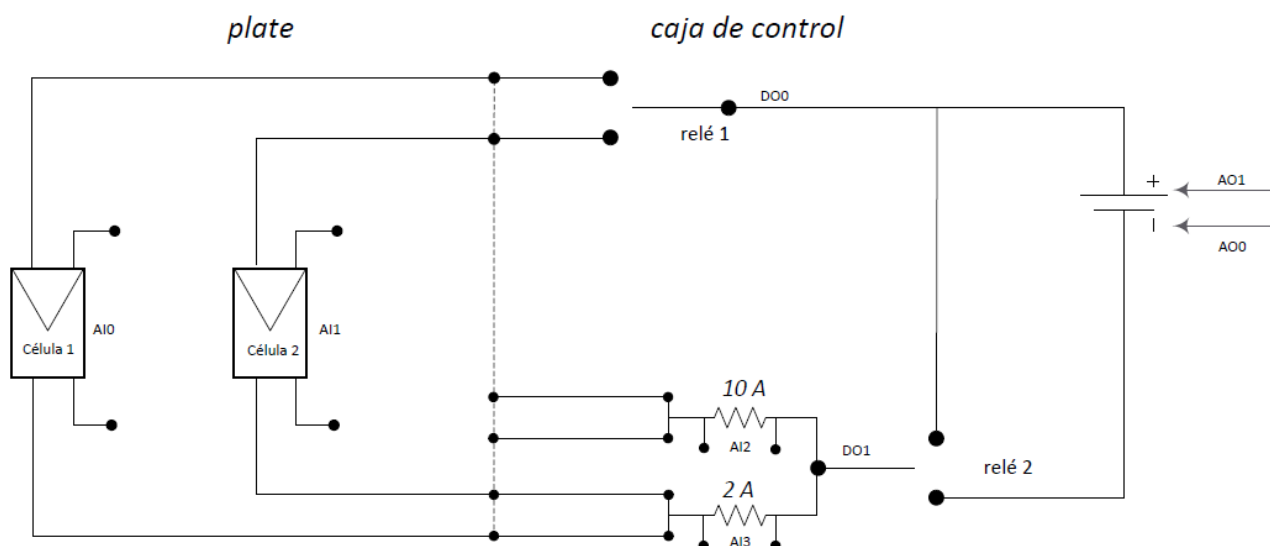


Figura 3.62 Circuito de medida de las curvas IV en oscuridad de cada célula

El circuito de medida que se puede observar en la figura permite la medida de la curva IV en oscuridad de ambas células.

Se disponen de dos canales de medida, uno de 2 A y otro de 10 A, con el propósito de poder realizar pruebas a diferentes tipos y tamaños de células, que sean capaces de generar más corriente y, por lo tanto, se necesite más margen de medida. Además, como siempre se ejecute un test se van a conocer las características específicas de las células, cada canal llevará un cableado distinto.

Otra cuestión a tener en cuenta es que el *CompactDAQ* adquirido solo permite la medida de tensiones, como se ha explicado con anterioridad. Por ello, es necesario acoplar un circuito de características conocidas que permita conocer la corriente que circula a partir de una tensión. El circuito en cuestión es el siguiente:

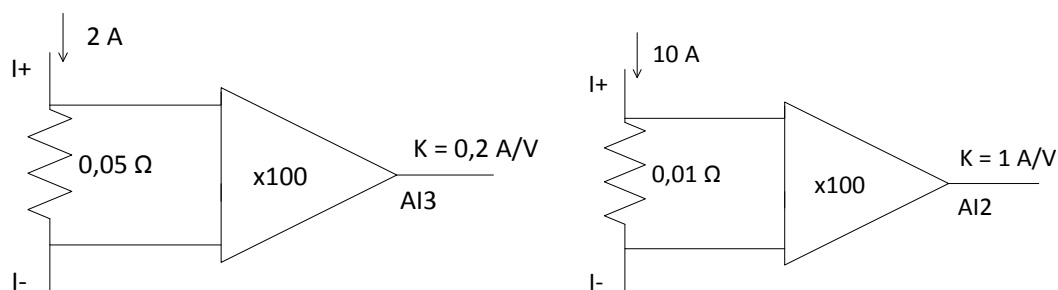


Figura 3.63 Circuito de medida de la corriente para cada uno de los canales de medida (circuito adaptador)

La constante de conversión para el canal de 2 A es de  $K = 0.2 \text{ A/V}$  y para el de 10 A es de  $K = 1 \text{ A/V}$ . Puede observarse que es necesaria la utilización de resistencias de alta precisión o *shunts* para poder

realizar la transformación de manera adecuada. Como esta resistencia es muy pequeña se acopla a continuación un amplificador para que la medida sea viable.

El relé 1 es el encargado de conmutar entre la célula 1 y la célula 2 mientras que el relé 2 cumple la función de conmutar entre la célula en estado de cortocircuito (resistencia muy baja) para medir la  $I_{SC}$  de cada célula cuando se está ejecutando el ciclo y el estado de medida de la curva IV en oscuridad. Estos relés son controlados por las salidas digitales del módulo NI 9375.

En este último estado nombrado entra en juego la fuente de alimentación de carga que se encarga de barrer en tensión la célula, siempre con una limitación en corriente específica para cada célula. Para programar dicha fuente se utilizan dos de las salidas analógicas del *CompactDAQ* adquirido.

La fuente de alimentación que realiza la función de barrido en tensión es la S 6-40 de DELTAELEKTRONIKA y sus principales características son las siguientes:

- Rango de voltaje : 0-6 V
- Rango de corriente : 0-40 A
- Posibilidad de apagado remoto mediante un relé

Las células a testear deberán de estar dentro de este rango de voltaje y corriente para ser compatibles con la máquina LYSS.

Para programar los parámetros de la fuente ésta dispone de dos terminales de entrada a tal efecto, denominados  $I_{prog}$  (AO1) y  $V_{prog}$  (AO0) que deberán de ser programadas en un rango de 0-5 V. Esto conlleva que a la hora de aplicar una tensión o corriente de limitación será necesario multiplicar el valor real deseado por una constante de fuente, que en este caso son las siguientes:

$$K_V = \frac{6\text{ V}}{5\text{ V}}; K_I = \frac{40\text{ A}}{5\text{ A}} = 8 \frac{\text{A}}{\text{A}}$$

donde

$$V_{real} = V_{prog} \cdot K_V; I_{real} = I_{prog} \cdot K_I$$

Para recoger los datos de tensión de cada célula se utilizan los primeros dos canales de entrada del *CompactDAQ*, denominados AI0 y AI1 respectivamente.

---

### 3.3.6 FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LA LÁMPARA DE ARCO DE XENÓN

La fuente de alimentación de la lámpara de arco de xenón que se describió en apartados anteriores juega el papel más importante de la cadena de dispositivos de la máquina ya que es la encargada de manejar la lámpara, que es el elemento más delicado de todos. Por este motivo, será necesario tener constancia en todo momento del estado de la fuente y, por consiguiente, de la lámpara.



Figura 3.64 Fuente de alimentación de la lámpara de arco de xenón

El modelo de fuente de alimentación que proporcionó el mismo fabricante que la lámpara es el *XLB-1500* de *Lumina Power* que viene acompañado además del módulo de ignición. Las principales características de esta fuente de alimentación son:

- Potencia máxima de salida : 1500 W
- Corriente máxima de salida : 75 A
- Máxima tensión de salida disponible : 35 V
- Tensión del módulo de ignición : hasta 40 kV

Debido a que la lámpara admite hasta 1000 W y la fuente tiene un potencia máxima de 1500 W, habrá que tener especial cuidado a la hora de controlar dicha potencia.

El terminal disponible para controlar la potencia de salida de la fuente es el denominado *Iprogram* que tiene un rango de 0-10 V, que será comandado por la salida *AO2* del *CompactDAQ*. Para controlar el apagado y encendido de la lámpara se utiliza un relé que conmuta entre una señal constante de 15 V proporcionada por la propia fuente y circuito abierto. Este relé es controlado por la salida digital *DO3* del *NI 9375*.

Además, dispone de terminales de monitorización de tensión y corriente, denominados *Vmon* e *Imon* respectivamente con los que se podrá saber con bastante precisión la potencia real de salida de la fuente. Estas dos señales de salida de la fuente están dentro de un margen de 0-10 V donde 10 V equivale a la tensión y/o corriente máxima.

Conociendo estos datos, se procede a medir estas señales con la lámpara conectada mientras se va variando la tensión *Iprogram* para conocer la potencia de salida real:



<u>Iprogram</u>	<u>Imon (V)</u>	<u>Iout (A)</u>	<u>Vmon (V)</u>	<u>Vout (V)</u>	<u>Psalida (W)</u>
0 V	1.06	7.95	6	21	166.95
1 V	1.17	8.775	6	21	184.275
2 V	1.97	14.775	5.26	18.41	272.00775
2.5 V	2.47	18.525	5	17.5	324.1875
3 V	2.97	22.275	4.9	17.15	382.01625
3.5 V	3.47	26.025	4.93	17.255	449.061375
4 V	3.98	29.85	5.14	17.99	537.0015
4.5 V	4.48	33.6	5.18	18.13	609.168
5 V	4.9828	37.371	5.242	18.347	685.645737
5.5 V	5.48	41.1	5.367	18.7845	772.04295
6 V	5.98	44.85	5.43	19.005	852.37425
6.5 V	6.4	48	5.6	19.6	940.8
7 V	6.987	52.4025	5.7	19.95	1045.429875

Tabla 3.2. Variación de la potencia de salida de la fuente de alimentación con respecto a la variable Iprog

Gráficamente esta tabla queda representada de la siguiente manera:

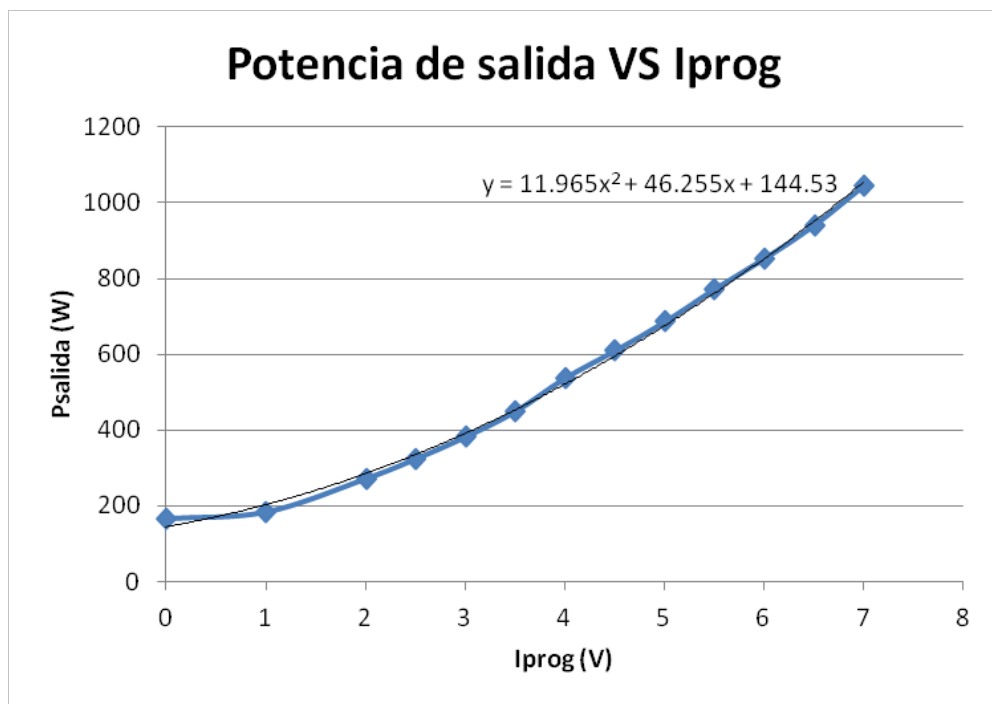


Figura 3.65 Gráfica de potencia de salida contra Iprog

Puede observarse que la relación entre la potencia de salida de la fuente de la lámpara y la variable de configuración Iprog sigue de forma aproximada una parábola de ajuste con ecuación:

$$Psalida (W) = 11.965 \cdot (Iprog(V))^2 + 46.255 \cdot Iprog (V) + 144.53$$

Será la ecuación utilizada para controlar la potencia de salida de la lámpara de arco de xenón adquirida.

Además, también se observa que se consigue la potencia máxima de la lámpara para un valor de  $I_{prog}$  de 7 V, que habrá que tener muy en cuenta a la hora de realizar la programación del software.

En otro orden de cosas, como puede observarse en la Tabla 3.2, la fuente de alimentación de la lámpara es una fuente que trabaja a tensión constante y que solamente varía su corriente para llegar a la potencia de salida deseada. Esto se observa en la siguiente figura:

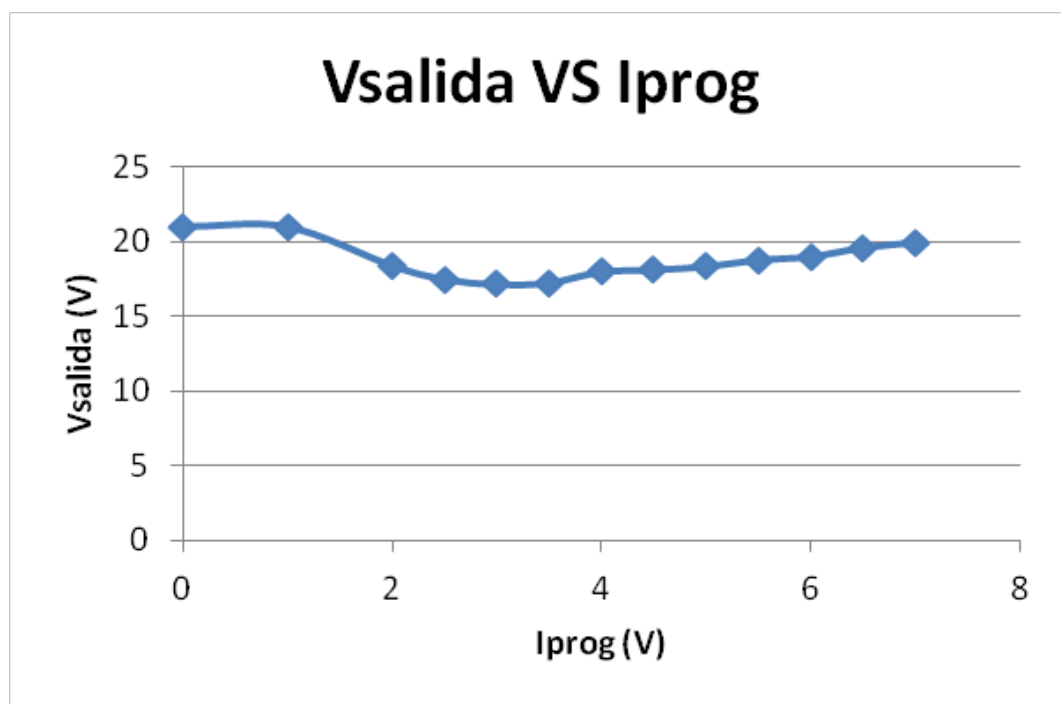


Figura 3.66 Gráfica de tensión de salida de la fuente contra  $I_{prog}$ .

Se observa que la tensión de salida de la fuente de la lámpara de arco de xenón es prácticamente constante en todo el rango de  $I_{prog}$  (V).

Por otro lado, para un correcto funcionamiento de la máquina y para no poner en peligro su integridad y la operario que esté utilizándola en cada momento es necesario tener constancia en todo momento del estado de la lámpara. Si hubiera algún problema el software debe de ser capaz de detectarlo y realizar las operaciones oportunas. Con este objetivo, la fuente de alimentación proporciona una señal de monitorización (*Lamp ON/OFF status*) del estado de la lámpara en todo momento (ON/OFF). Tiene un valor de 15 V cuando la lámpara está apagada y de 0 V cuando se encuentra encendida. Se utiliza la entrada *DIO* para monitorizar en todo momento esta señal ayudándose de un circuito de inversión de la lógica que se encuentra representado en el Anexo 2. Este circuito provoca que esta señal sea congruente con el estado de la lámpara, dando un valor nulo cuando ésta se encuentra apagada y un valor de 15 V cuando está encendida.

### 3.4 ESTRUCTURA FINAL

Una vez adquiridos todos los elementos que van a componer la máquina LYSS es necesario fabricar una estructura a medida que permita posicionar de forma sencilla todos los elementos de manera que puedan realizar las tareas necesarias para el correcto funcionamiento de la máquina. Además, es necesario incluir elementos de protección para controlar cualquier tipo de suceso no deseado en la máquina que pudiera resultar peligroso.

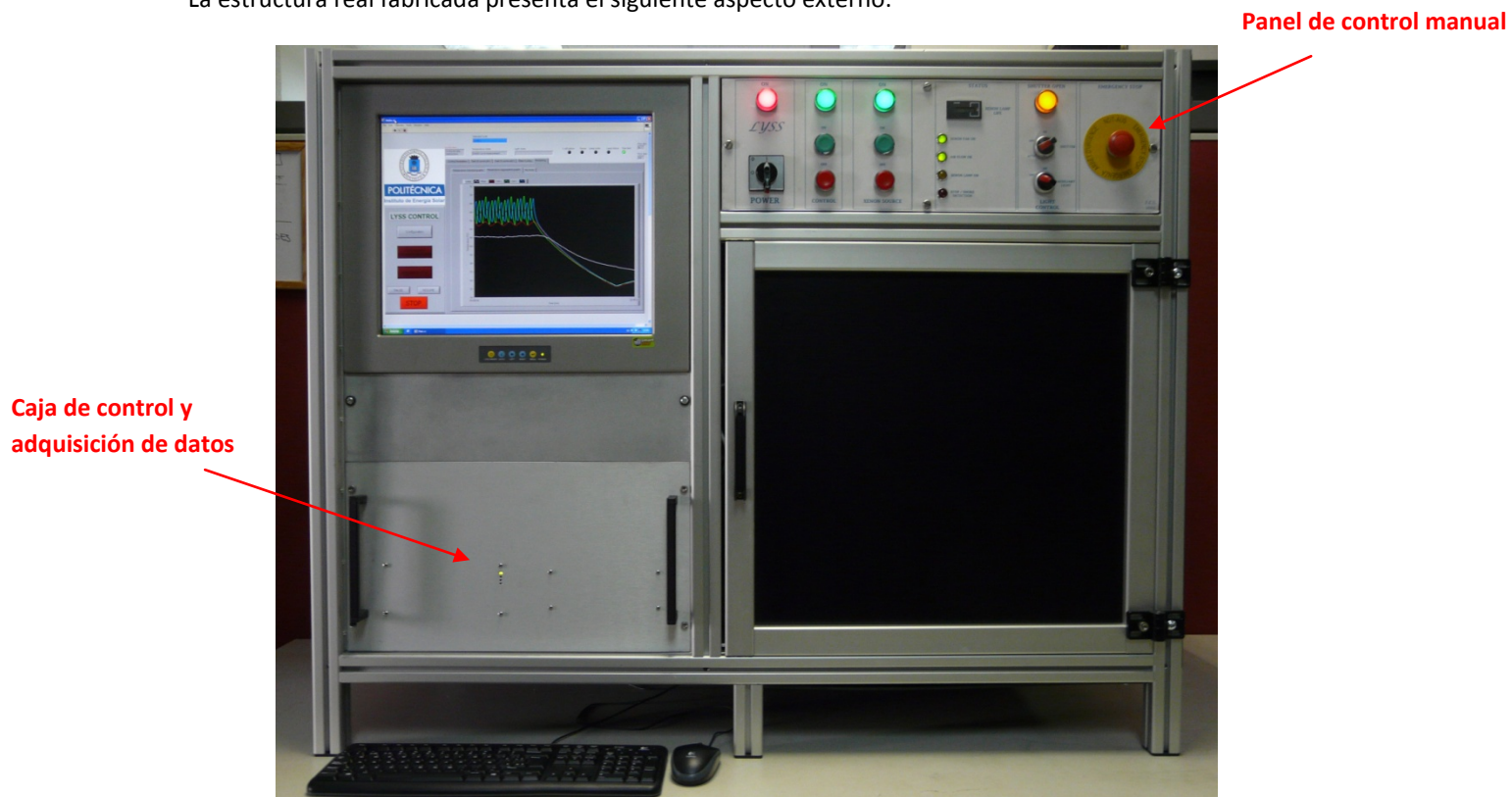
### Estructura general

La estructura fabricada se construye, en esencia, con perfiles, uniones, tuercas y paneles del fabricante *ITEM*. En concreto, el aspecto externo que posee es similar al mostrado en la siguiente figura:



*Figura 3.67 Representación del diseño externo de la estructura de soporte de la máquina LYSS*

La estructura real fabricada presenta el siguiente aspecto externo:



*Figura 3.68 Fotografía del aspecto externo real de la máquina LYSS*

En el interior se encuentran todos los dispositivos empleados para el funcionamiento de la máquina, es decir, lámpara, placa enfriadora, actuador lineal, espejo, etc. Esto se muestra en la siguiente figura:

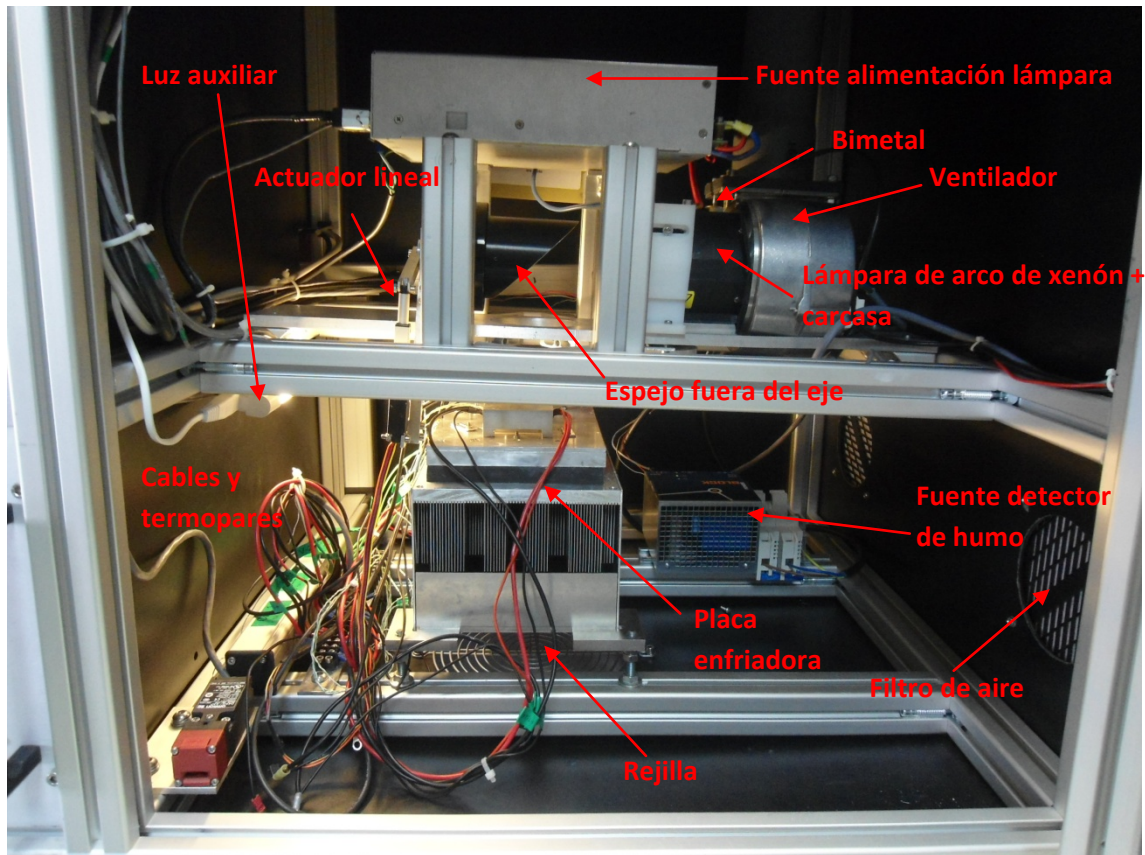


Figura 3.69 Interior de la máquina LYSS

En esta figura se observa que la estructura que sujeta, entre otras cosas, la lámpara y el espejo se encuentra inclinada  $2.5^\circ$  atendiendo a lo que se explicó anteriormente en el apartado 3.2.3.5.

Para una correcta refrigeración de la lámpara y demás dispositivos se colocan filtros de aire que permiten que entre aire frío y limpio a la estructura. Además, se utilizan dos ventiladores axiales tipo 3656 de *ebmpapst* para expulsar aire caliente desde dentro de la estructura. Uno de ellos expulsa aire desde la parte superior de la zona donde se encuentra la caja de control y adquisición de datos y el otro desde la parte superior de la zona que se muestra en la figura anterior. También se incluye una rejilla debajo de la placa enfriadora para que el ventilador asociado a ésta expulse el aire al exterior y así evitar que se mantenga dentro de la estructura.

Por otro lado, el interior de la caja de control y adquisición de datos se muestra a continuación:



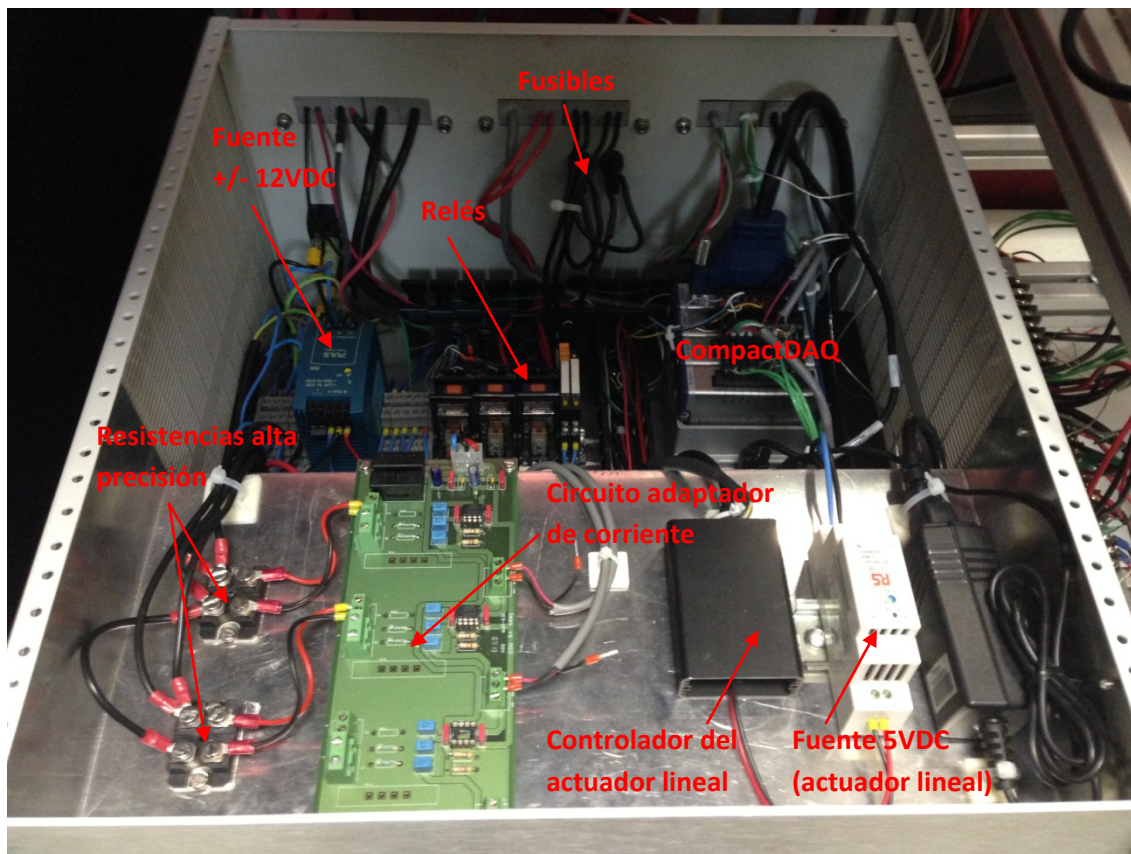


Figura 3.70 Interior de la caja de control y adquisición de datos

En la caja de control y adquisición de datos también se encuentran elementos que no se muestran en la imagen anterior, ya que se encuentran debajo de la placa donde están situados el controlador del actuador lineal, el circuito adaptador de corriente etc. Estos son:

- Fuente de alimentación para la realización del barrido en tensión de la curva IV en oscuridad.
- Controlador y fuente de alimentación de la placa enfriadora.

### Elementos de protección

Para evitar daños en los componentes de la máquina así como el operario y el entorno donde ésta se encuentre situada, se instalan los siguientes elementos de protección:

- Bimetal

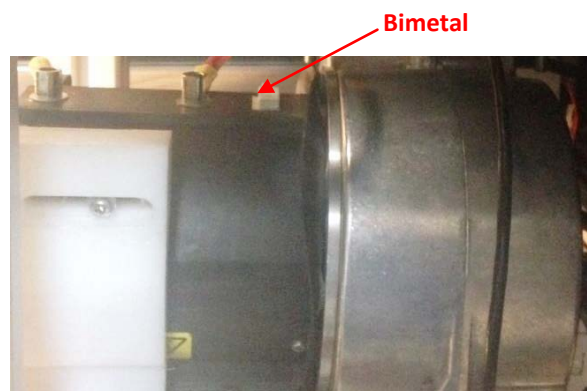


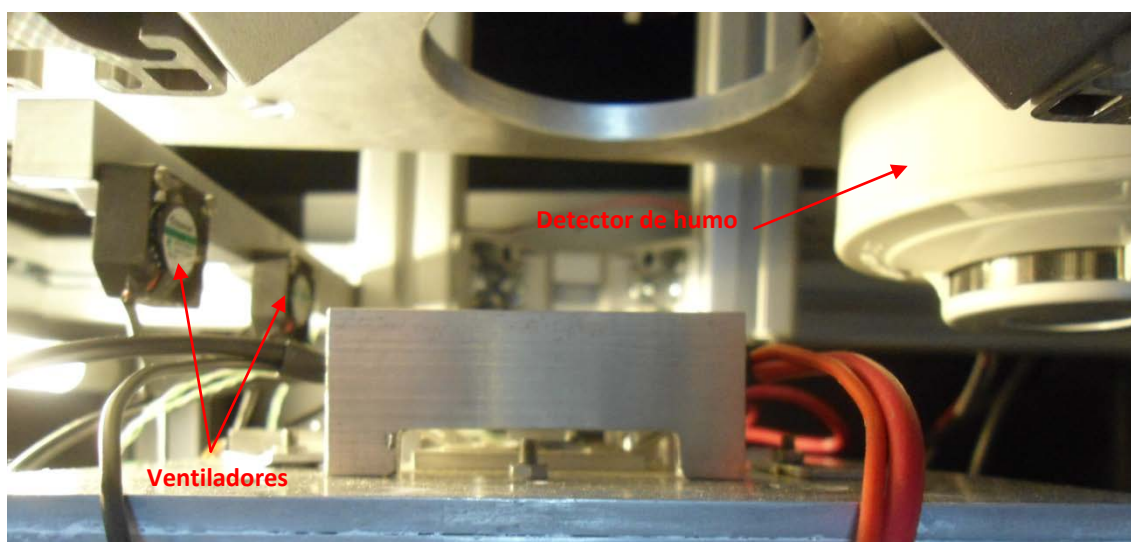
Figura 3.71 Fotografía que muestra donde se encuentra instalado el bimetal de protección

En la imagen anterior se muestra bimetálico de protección, que como ya se indicó en el capítulo 3 es un dispositivo con dos terminales entre los cuales se produce un circuito abierto cuando su temperatura alcanza los 75 °C. Mientras se mantenga a una temperatura menor produce un cortocircuito.

Un terminal de este bimetálico está conectado a la entrada *Interlock* de la fuente de alimentación de la lámpara y el otro a un terminal tierra (*GND*) que proporciona la propia fuente (Ver Anexo 1). Si la entrada *Interlock* está conectada a tierra la fuente funciona y si, por el contrario, se encuentra en circuito abierto ésta deja de hacerlo. De esta manera si la temperatura del bimetálico alcanza los 75 °C la fuente dejará de proporcionar potencia a la lámpara y ésta se apagará para evitar su sobrecalentamiento.

- Detector de humo

Al trabajar con concentraciones de potencia luminosa muy altas podría llegar a producirse una combustión que conllevara la producción de humo en algún lugar cercano a cada una de las células (por ejemplo, un cable de conexión comienza a quemarse). Este fenómeno podría poner en peligro la integridad física del operario, así como la de la máquina y la del entorno donde ésta esté situada. Por ello, se decide instalar un detector de humo y dos ventiladores de poca superficie y poco flujo de aire enfocando a cada célula y/o secundario para guiar el humo que pudiera producirse en esa zona hasta dicho detector, tal y como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 3.72 Detector de humo y ventiladores asociados a cada célula*

El detector de humo utilizado es el modelo *RM1000* del fabricante *ABUS Security-Center* y funciona con una tensión continua de entre 10-15 V.

Se configura para que sus terminales de alarma (terminales 4 y 6, según el fabricante) se encuentren en cortocircuito en condiciones normales de modo que cuando éste capte partículas de humo, conmute a circuito abierto. Los terminales anteriormente mencionados se cablean hacia otros terminales que se encuentran en el panel de control manual (terminales *TBS7* y *TBS8*, ver Anexo 2). Desde este panel se deja de alimentar a la fuente de alimentación de la lámpara de arco corto de xenón si el detector de humo entra en modo alarma (circuito abierto entre sus terminales) para que cese la combustión producida por el haz de luz con alta irradiancia. Además, también se dejaría de alimentar la caja de control y adquisición de datos.

# CAPÍTULO 4 : DISEÑO DEL SOFTWARE





## 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a ver en profundidad la programación de la aplicación de control y monitorización de la máquina LYSS. Como ya se conoce de capítulos anteriores, esta aplicación ha sido implementada mediante el entorno gráfico de programación *LabVIEW*, cuyos programas se denominan Instrumentos Virtuales (*Virtual Instruments*, VI a partir de ahora). Un programa en *LabVIEW* se divide en Panel Frontal y Diagrama de bloques. El Panel Frontal es el interfaz con el usuario, en el que se definen los controles e indicadores que se muestran en la pantalla. El diagrama de bloques es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan.

El programa se compone de un VI principal denominado *Main*. Este VI se encarga de realizar tareas de forma continua, así como de llamar a otros VIs, denominados subVIs, que realizan diversas tareas, como se explicará en los siguientes apartados.

En la implementación de la aplicación software el idioma usado es el inglés debido a que la máquina está diseñada para su industrialización internacional.

### 4.1.1 COMPATIBILIDAD DE LOS DISPOSITIVOS CON LABVIEW

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, todos los dispositivos adquiridos son controlables por *LabVIEW*. Los fabricantes proporcionan VIs de control y configuración para que el usuario pueda interactuar con el dispositivo de manera sencilla. A continuación, se exponen de manera resumida:

#### CompactDAQ

El controlador de hardware proporcionado para el *NI CompactDAQ* es el *NI DAQmx*, el cual incluye herramientas para configuración y depuración y APIs (*Application Programming Interface*) de control avanzado. Incluye VIs con los que se pueden realizar una gran variedad de operaciones. Los que se utilizarán en la aplicación diseñada para el control de la máquina LYSS son los siguientes:

- *DAQmx Create Virtual Channel*: crea un canal virtual o un conjunto de canales virtuales y los añade a una tarea. Las instancias de configuración de este VI corresponden con el tipo de canal, tales como entrada analógica, salida digital, entrada de termopar etc.

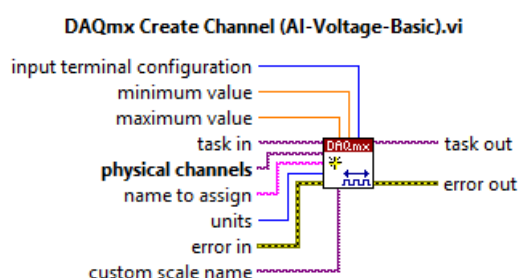


Figura 4.1 DAQmx Create Channel (AI-Voltage Basic)

En este caso el canal virtual creado se utiliza para leer señales de entrada analógica de tensión (instancia *AI-Voltage-Basic*). Se pueden configurar los parámetros de la tarea de salida, como el canal físico, el valor máximo y mínimo de entrada, las unidades, etc.

- *DAQmx Start Task*: inicializa la tarea correspondiente para empezar la medida o generación de datos.

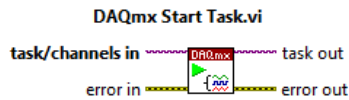


Figura 4.2 DAQmx Start Task

- *DAQmx Read* : lee muestras desde la tarea o los canales virtuales de entrada. Las instancias de estos VIs especifican el formato en el que se devuelven. Por ejemplo, se puede leer una sola muestra o varias, al igual que se puede leer de un solo canal o de varios.

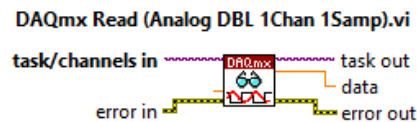


Figura 4.3 DAQmx Read (Analog DBL 1Chan 1Samp)

En el ejemplo anterior se lee una sola muestra (1Samp) de tipo *double* proveniente de un único canal (1Chan).

- *DAQmx Write* : escribe muestras a la tarea o los canales virtuales especificados por el usuario. Las instancias especifican el formato de las muestras a escribir, al igual que en el VI *DAQmx Read*.

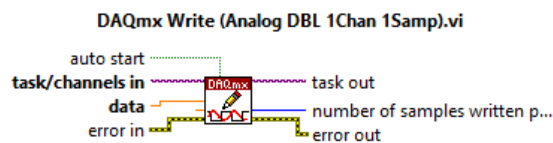


Figura 4.4 DAQmx Write (Analog DBL 1Chan 1Samp)

En este ejemplo se escribe una sola muestra (1Samp) de tipo *double* en un canal específico (1Chan).

- *DAQmx Clear Task* : limpia la tarea de entrada. Antes de limpiarla la aborta, si es necesario, y libera los recursos asociados a ésta.

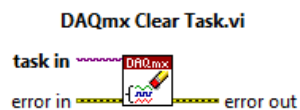


Figura 4.5 DAQmx Clear Task

### Controlador del actuador lineal

El fabricante del actuador lineal y el controlador asociado proporciona los siguientes VIs que serán utilizados para controlar y monitorizar el dispositivo.

- *MPUSBOpen*: abre sesión USB con un identificador de proceso (PID, *Process ID*) asociado (por defecto configurado por el fabricante) y devuelve el identificador (HANDLE) que será utilizado para poder identificar el dispositivo en los demás VIs.

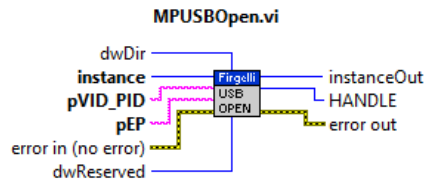


Figura 4.6 MPUSBOpen

Además, proporciona el *MPUSBClose* que, como su propio nombre indica, se utiliza para cerrar una sesión USB asociada a un determinado identificador (HANDLE). También existen los VIs *MPUSBRead* y *MPUSBWrite* que sirven para realizar funciones de lectura y escritura USB a nivel de proceso.

- *Set Velocity* : controla la velocidad (parámetro *Velocity*) del actuador lineal en un rango del 0% al 100%.

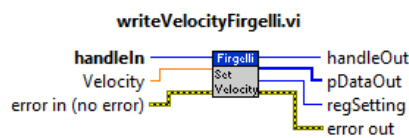


Figura 4.7 writeVelocityFirgelli

- *Set Accuracy*: configura la precisión asociada al actuador. En el caso de la máquina LYSS ya se indicó que el valor *accuracy* de entrada a este VI es de 1, lo que significa una precisión de  $\pm 0,05$  mm. Además, también se configura la longitud máxima del actuador mediante *maxLength*.

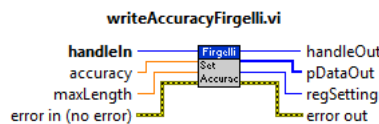


Figura 4.8 writeAccuracyFirgelli

- *Position Move* : el valor de *Position (mm)* se envía para establecer la posición deseada en el actuador. Además, se debe de establecer la longitud máxima del actuador mediante el control *lengthMax*.

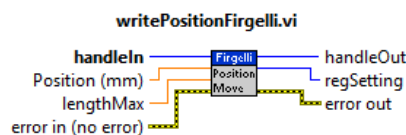


Figura 4.9 writePositionFirgelli

- *Position Read* : lee la posición actual del dispositivo con identificador de entrada *handleIn* y lo muestra en el indicador *pDataOut*.



Figura 4.10 readPositionFirgelli

### Controlador de la placa enfriadora

Los VIs que proporciona el fabricante del controlador de la placa enfriadora que se van a utilizar en el software de la máquina LYSS son los siguientes:

- *Serial Port Config* : este VI está diseñado para establecer la comunicación del PC con el controlador de la placa enfriadora. Se establecen los parámetros de comunicación de puerto serie (paridad, tasa de bits, control de flujo, etc.) así como el puerto a utilizar (normalmente COM1). También permite cerrar y reiniciar sesión alterando el valor de *Port Command*. Este VI proporciona a la salida el nombre de un puerto de entrada/salida, que será utilizado en los demás VIs como parámetro de entrada para identificar la placa enfriadora.

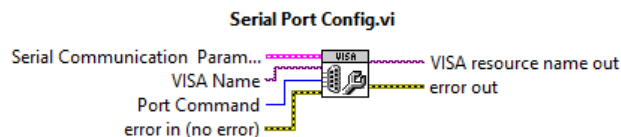


Figura 4.11 Serial Port Config

- *RS-232 Communication* : permite el manejo de todos los parámetros del controlador explicados con anterioridad, como la temperatura consigna, el ancho de banda proporcional, etc.

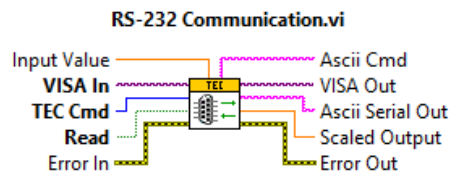


Figura 4.12 RS-232 Communication

El control *TEC Cmd* es el que contiene todos los parámetros modificables mediante este VI. Además, si *Read* está activo permite leer el valor que tiene un parámetro determinado en ese momento.

## 4.2 MAIN

### 4.2.1 PANEL FRONTAL

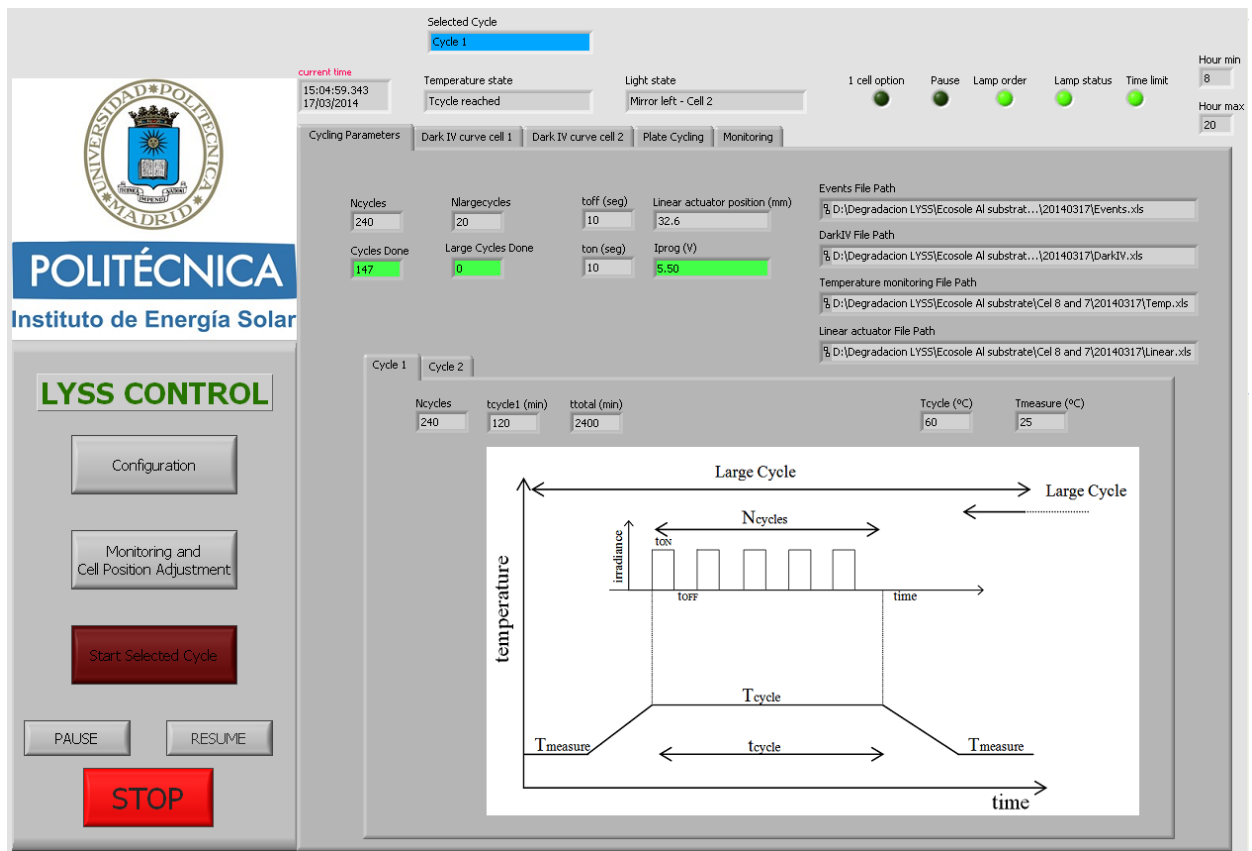


Figura 4.13 Panel frontal de Main (VI principal)

Como puede observarse en la figura anterior, la aplicación posee una interfaz donde se encuentran varios botones que corresponden a diferentes funciones, estos son:

- *Configuration*
- *Monitoring and Cell Position Adjustment*
- *Start Selected Cycle*
- *PAUSE* y *RESUME*
- *STOP*

El panel frontal de *Main* incluye también indicadores en su parte superior, que se resumen a continuación:

- *Current time* : hora del sistema
- *Selected Cycle*: indica el ciclo seleccionado
- *Temperature state*: indicador textual que proporciona al usuario información sobre en qué estado se encuentra la máquina dentro del ciclo térmico que se esté llevando a cabo en ese momento. Indica estados del tipo ramp to *Tmeasure* (la placa está trabajando para llegar a la temperatura de medida), *Tcycle reached* (temperatura de ciclo 1 alcanzada), ramp to *Tmax* (hacia la temperatura máxima del ciclo 2), etc.

- *Light state*: igual que el anterior pero con referencia a los estados del ciclado de luz. Indica estados del tipo *Lamp ON* (lámpara encendida), *Mirror right - Cell 1* (el espejo fuera del eje gira hacia la izquierda, lo que corresponde con la posición asociada a la célula 1) , etc.
- Indicadores booleanos:
  - *1cell option*: si está encendido, significa que el usuario ha escogido la opción de testear solo la célula número 1. La aplicación entiende que no hay ninguna célula conectada físicamente a los canales asociados a la célula número 2.
  - *Pause*: si está encendido significa que la aplicación se encuentra en estado de pausa.
  - *Lamp order* y *Lamp status*: orden enviada a la lámpara y estado real de la misma continuamente monitorizado por la entrada *DIO* del *NI 9375*, respectivamente. Estas variables se empiezan a comparar de manera continua una vez transcurridos 5 segundos desde que se envía la orden de encendido a la lámpara. Si éstas no son iguales se produce un error y se detiene la ejecución del ciclo en cuestión.
  - *Time limit*: si está encendido, significa que el usuario a activado en configuración la opción de limitar el tiempo de operación de la máquina.
- *Hour min* y *Hour max*: hora mínima y máxima de operación de la máquina. Después de cada medida curva IV en oscuridad, se comprueba que la hora del sistema se encuentre dentro del horario fijado por éstas. Además, comprueba que la hora actual sumada al tiempo estimado del ciclo térmico-luminoso seleccionado no supera dicho horario. Si se cumplen ambas condiciones se procede a realizar el ciclo correspondiente. Si no es así, el sistema se mantiene en pausa hasta que se cumplan.

Además, se compone de varios menús (pestañas) cuyas funciones se resumen a continuación.

### Cycling Parameters

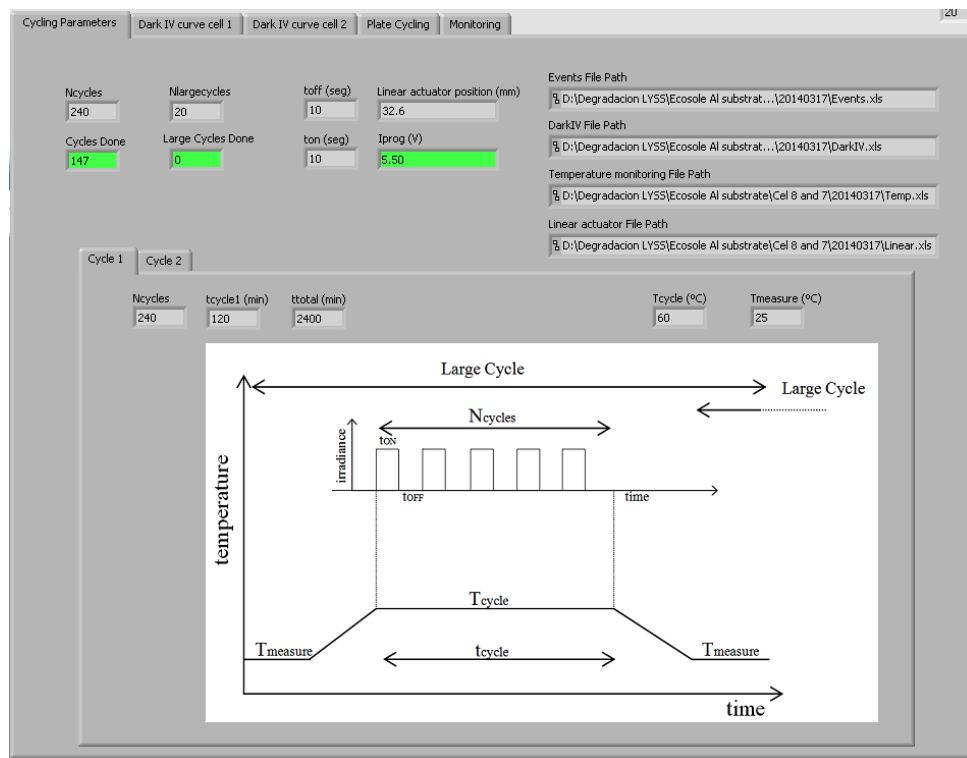


Figura 4.14 Menú Cycling Parameters

Se compone de indicadores que muestran los diferentes parámetros con los que se ha configurado la aplicación dentro del subVI *Configuration* (se explicará en el apartado correspondiente) para que el usuario pueda comprobarlos en todo momento. Además, posee dos contadores numéricos que proporcionan información sobre el número de ciclos cortos (ciclos de luz) y largos (ciclos térmico-luminosos + medidas de la curva IV en oscuridad) que se han realizado en ese instante.

### Dark IV curve

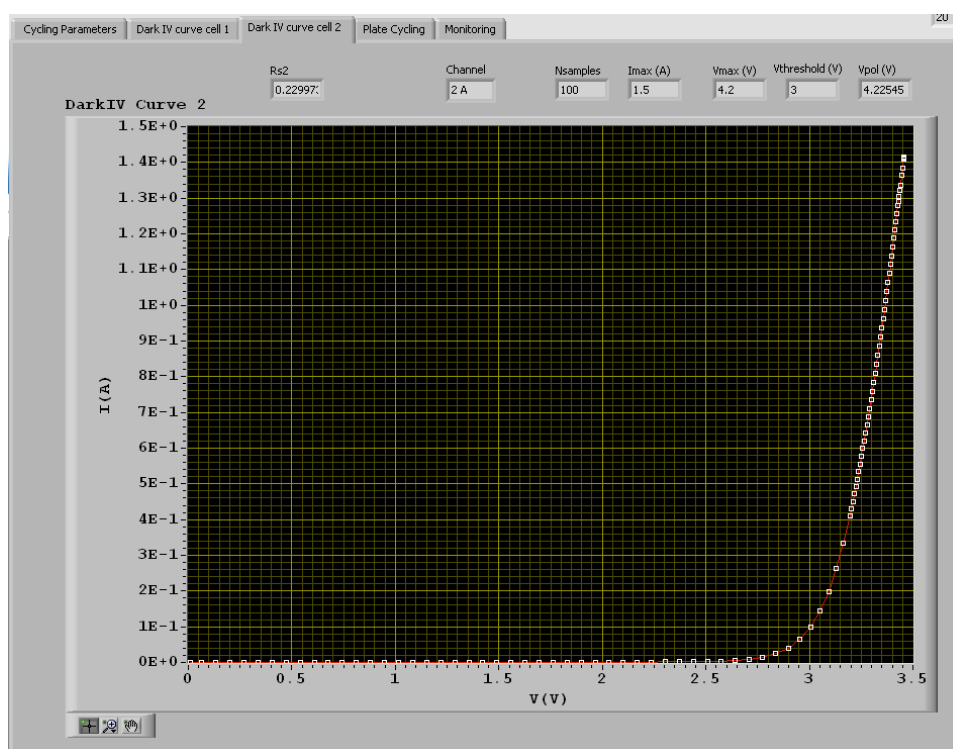


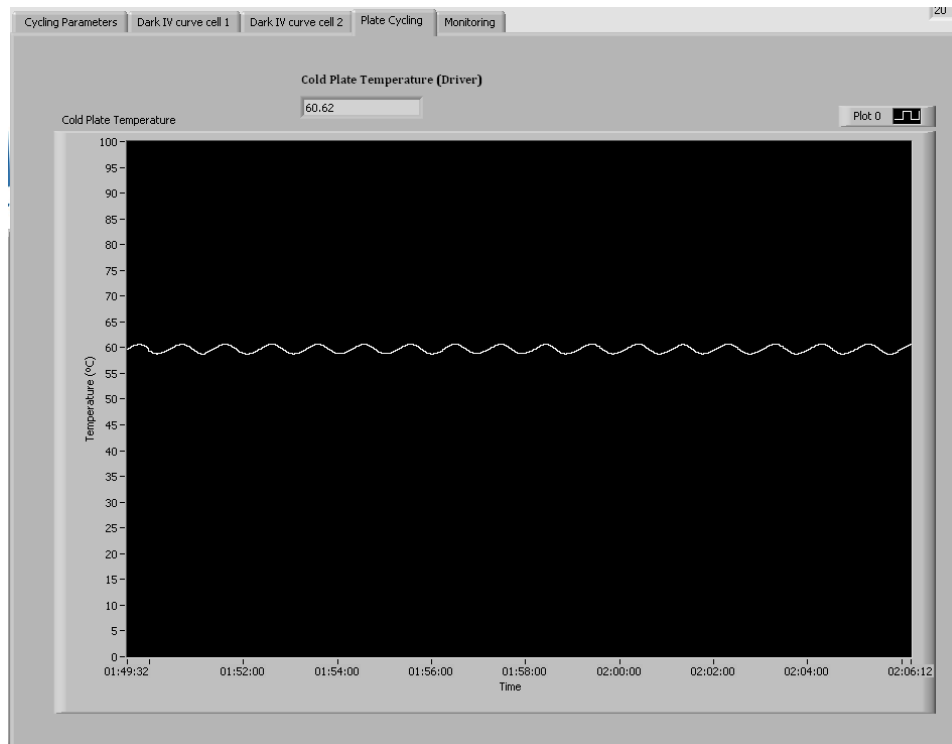
Figura 4.15 Menú Dark IV curve

Tanto para la célula 1 como para la célula 2, este menú muestra gráficamente la curva IV en oscuridad adquirida. Además, posee indicadores sobre el canal de medida configurado, el número de muestras de la curva, etc. Estos parámetros se explicarán en el siguiente apartado.

Asimismo, después de cada medida se calcula la resistencia serie de cada célula y se almacena su valor en el fichero destinado a almacenar los valores IV de las curvas en oscuridad.



### **Plate Cycling**



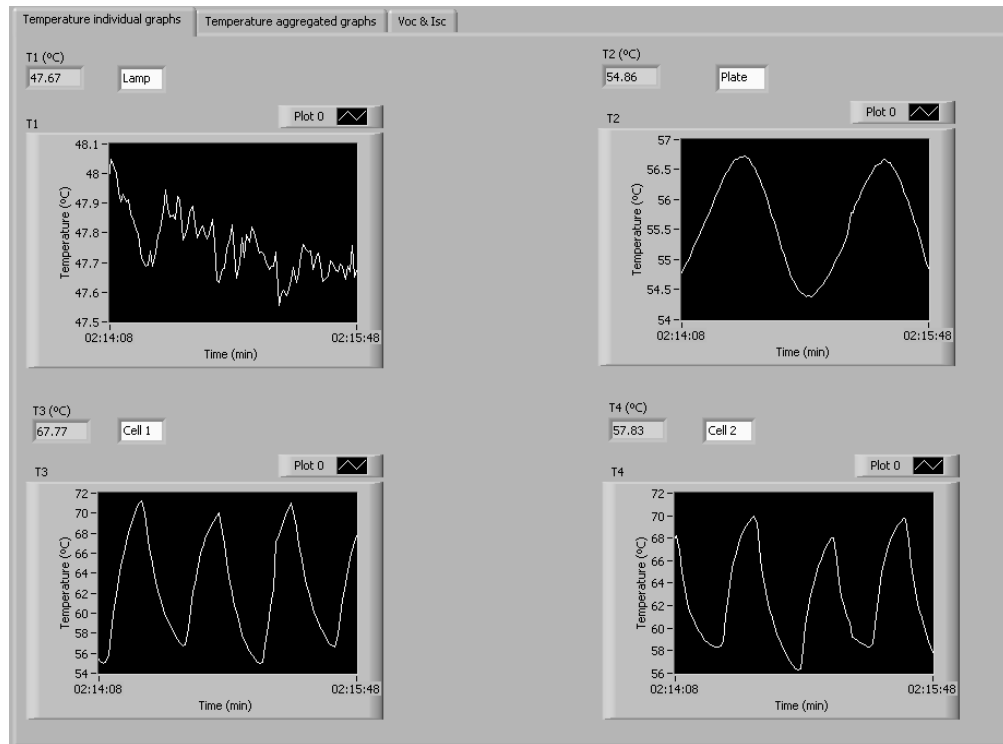
*Figura 4.16 Menú Plate Cycling. Temperatura captada por el termistor de referencia de la placa enfriadora.*

Este menú se compone de un indicador gráfico y otro numérico que muestra la temperatura (en °C) que toma como referencia el controlador de la placa enfriadora que se explicó en el capítulo anterior. Con esto se puede observar en todo momento la temperatura que capta el termistor de referencia cuando la placa está en funcionamiento, ya que si está apagada muestra un valor nulo continuo al no existir comunicación entre el ordenador y el controlador.

### **Monitoring**

Este menú contiene 3 submenús mediante los cuales el usuario podrá tener conocimiento en tiempo real de las medidas de temperatura de los termopares y de la  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  de cada célula en proceso de ciclado.

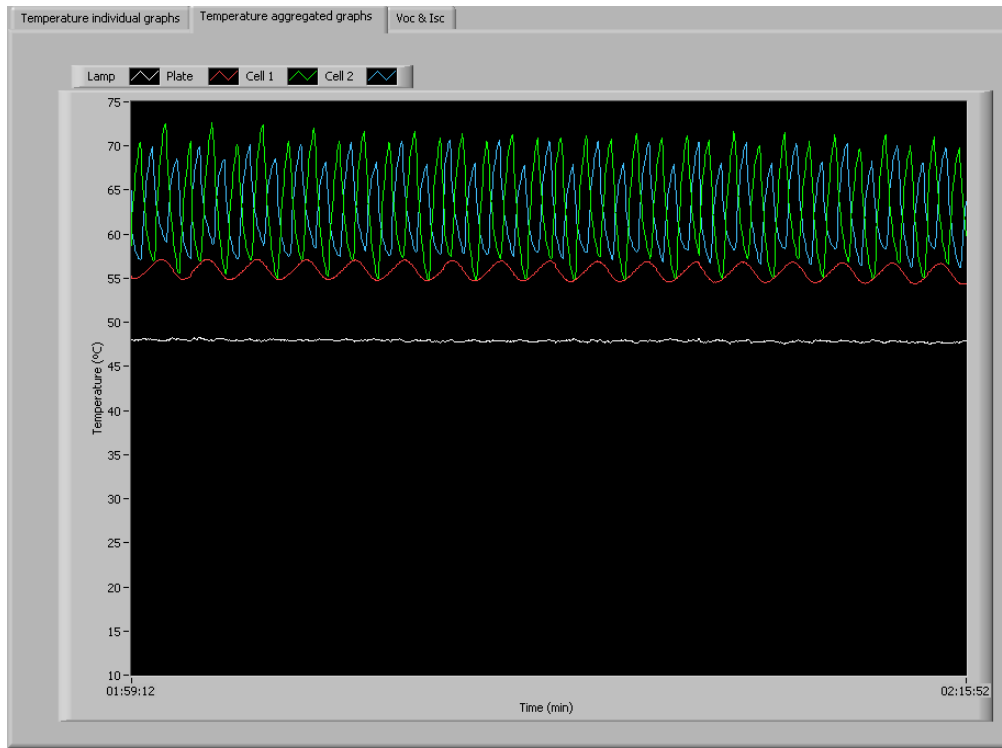
### **Monitoring : Temperature individual graphs**



*Figura 4.17 Menú Monitoring - Temperature individual graphs. Temperatura de la lámpara (Lamp), de la placa enfriadora (Plate) y de las células 1 (Cell 1) y 2 (Cell 2) captadas por los termopares conectados al módulo NI 9211.*

Este submenú tiene la función de monitoreo de las señales de temperatura procedentes de los termopares conectados al módulo NI 9211 de forma individual. Como el lugar donde se colocan los termopares es una elección del usuario, se permite cambiar el nombre de cada gráfico individual, que implicará un cambio en la leyenda del gráfico agregado, para que no exista posibilidad de confusión.

### **Monitoring : Temperature aggregated graphs**



*Figura 4.18 Menú Monitoring - Temperature aggregated graphs. Todas las señales de temperatura procedente de los termopares del módulo NI 9211 pintadas en una misma gráfica*

Muestra la misma información que el submenú anterior pero con todas las señales de temperatura agregadas en el mismo gráfico.

### Monitoring : $V_{OC}$ & $I_{SC}$

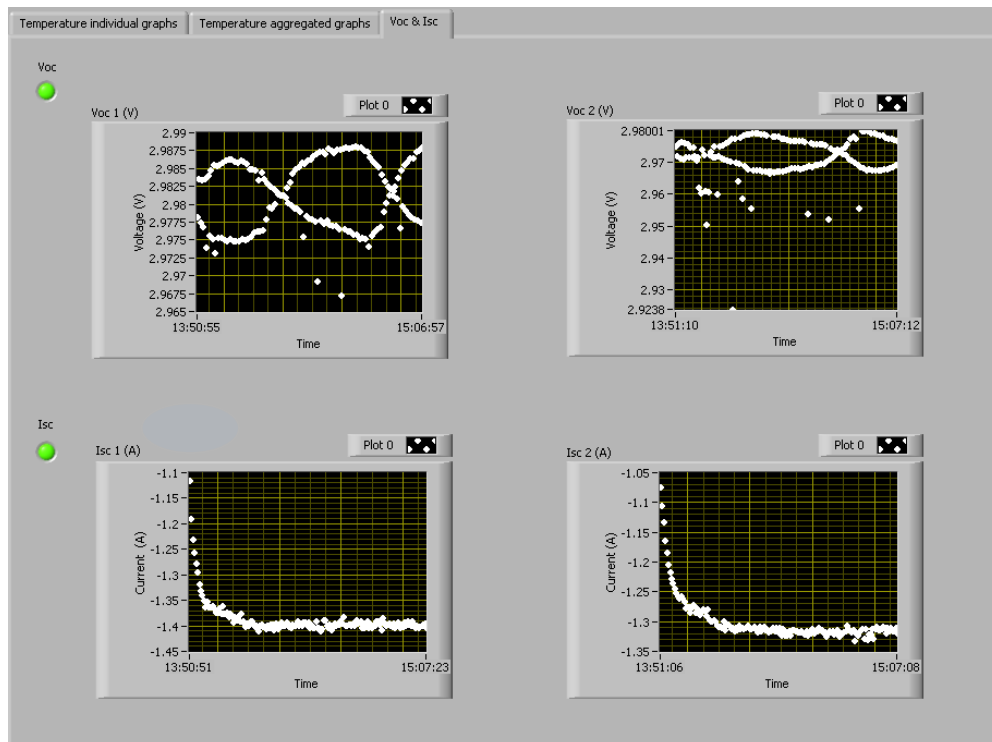


Figura 4.19 Menú Monitoring -  $V_{OC}$  &  $I_{SC}$ . Tensión de circuito abierto (parte superior) y corriente de cortocircuito (parte inferior) de las células 1 y 2.

Permite visualizar en gráficos la corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) y/o la tensión en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) de cada célula con respecto a la hora del sistema, tal y como se haya configurado en el subVI *Configuration*.

#### 4.2.2 ESTRUCTURA INTERNA

Al comenzar el programa, se inicializan todas las variables por defecto, se crean tareas de control y de adquisición de datos con el *CompactDAQ* y se abre una sesión USB con el controlador del actuador lineal en la que se establecen sus principales parámetros, como su longitud, velocidad y precisión.

Una de las características que posee el entorno *LabVIEW* es la de permitir la ejecución de varios bucles *while* en paralelo, de forma que el propio programa administra los recursos del PC de forma automática.

Teniendo en cuenta lo anterior, *Main* se compone de dos bucles *while* en paralelo. Ambos contienen una estructura de eventos asociados a distintos botones o eventos de usuario.

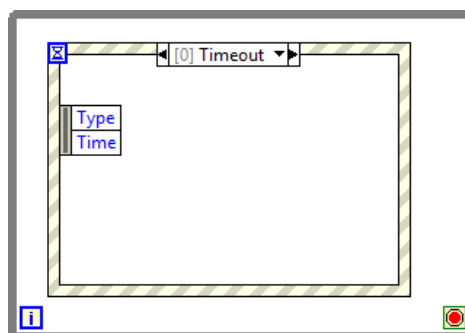


Figura 4.20 Bucle while que contiene una estructura de eventos (event structure)

El bucle principal contiene la estructura de eventos que están asociados a los botones anteriormente mencionados: *Configuration*, *Monitoring and Cell Position Adjustment* y *Start Selected Cycle*, que serán explicados con detalle en apartados posteriores.

El segundo bucle *while* ,que funciona en paralelo con el bucle principal, se compone de otra estructura de eventos compuesta por:

- *STOP*. Cuando el usuario pulsa el botón correspondiente se encarga de cambiar el estado de los relés destinados a controlar la lámpara y la placa enfriadora apagando ambas. Además, cambia una variable global llamada *Stop* que permite desactivar todos los bucles que estén en funcionamiento en ese momento (de manera totalmente asíncrona). Con todo desactivado, la aplicación de control queda parada hasta que el usuario la ponga de nuevo en marcha.
- *PAUSE*. Cuando el usuario pulsa el botón se activa otra variable local, *PAUSE*, que hace que la ejecución del programa se detenga en la siguiente medida de la curva IV en oscuridad, es decir, si, por ejemplo, se pulsa en mitad de un ciclo térmico-luminoso, éste terminará de manera normal, medirá las curvas IV correspondientes y, acto seguido, se quedará en espera hasta que el usuario pulse el botón *RESUME*.
- *Evento de usuario*. Si la comparación entre *Lamp order* y *Lamp status* que se ha indicado anteriormente produce un *False*, se muestra un mensaje en el panel frontal indicando que la lámpara puede haber sufrido un problema y se pide al usuario que ésta sea revisada, así como sus conexiones. Internamente, se lanza un evento de usuario encargado de cesar la ejecución del ciclo largo correspondiente y poner en estado de reposo el relé de apagado/encendido de la lámpara para evitar que ésta pueda sufrir daños.

Además, gracias al *Timeout* que contiene la estructura de eventos de LabVIEW, que es el tiempo máximo de espera a que ocurra un evento, se ejecutan continuamente (a menos que el sistema se encuentre en pausa) una serie de funciones:

- Temperatura captada por los termopares conectados al módulo *NI 9211*. Se muestra a continuación un esquema simplificado en *LabVIEW*:

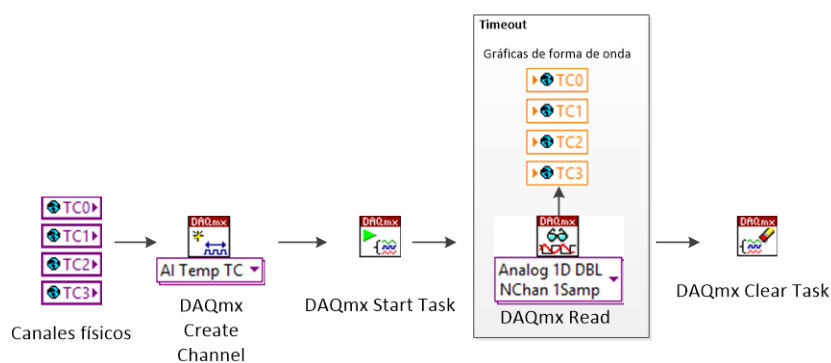


Figura 4.21. Esquema de la adquisición de datos de temperatura procedente de los 4 termopares conectados al módulo *NI 9211*

El procedimiento a seguir es el de crear la tarea que contiene los canales físicos de adquisición de temperatura correspondientes a los termopares. Después se inicia la tarea y, una vez dentro del *Timeout*, se leen las señales procedentes de cada uno de los canales y se guardan en variables globales del tipo gráfica de forma de onda (las gráficas del menú *Temperature individual graphs*). Cuando la ejecución del programa termina, se limpia la tarea para evitar conflictos al reiniciar.

- Escribe la señal *lprog* (V) que maneja la potencia de salida de la fuente de alimentación que controla la lámpara de arco de xenón, mediante el canal de salida AO2 del módulo NI 9263.

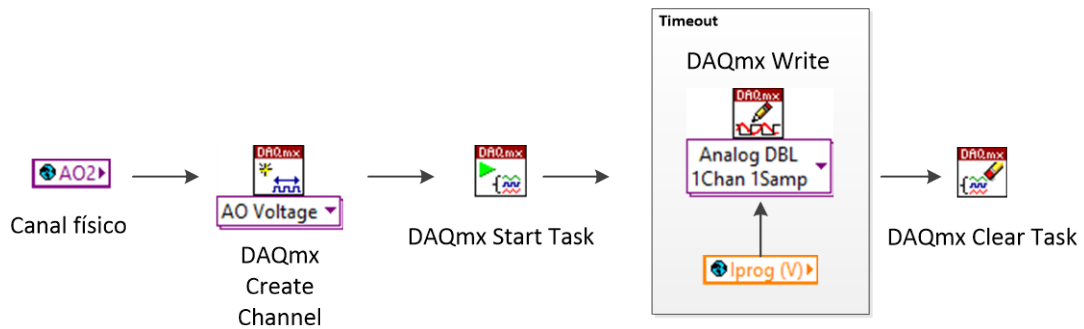


Figura 4.22 Esquema de las funciones de LabVIEW utilizadas para escribir la *lprog* (V) consigna en el canal AO2.

De la misma manera que en el apartado anterior se procede a crear la tarea, en este caso de salida, que contiene el canal físico asociado al terminal *lprogram* de la fuente de la lámpara, se inicia la tarea y, una vez dentro del *Timeout*, se escribe en dicho canal el valor de tensión que proporciona la variable global *lprog* (V). Cuando la ejecución del programa termina, se limpia la tarea para evitar conflictos al ser reiniciar.

- Lectura del estado de la lámpara utilizando el canal DIO.

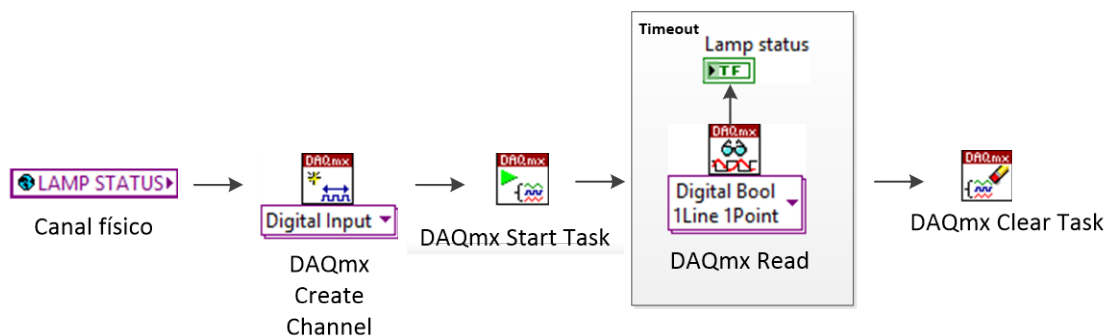


Figura 4.23 Esquema de las funciones de LabVIEW utilizadas para medir el estado de la lámpara

Se procede de igual manera que las anteriores señales guardando el valor medido en la variable booleana *Lamp status*. Al usar el circuito inversor de la lógica mencionado anteriormente y situado en el panel de control manual de la máquina (ver Anexo 2), si este canal lee un nivel bajo significa que la lámpara se encuentra apagada y si es un nivel alto la lámpara se encuentra encendida.

- Lectura de la posición del actuador lineal actual. Se realiza con los subVIs proporcionados por el fabricante:



Figura 4.24 Esquema de funciones utilizadas para leer la posición actual del actuador lineal

El procedimiento que se sigue es el de establecer conexión con el controlador del actuador lineal mediante el subVI *USB OPEN* y, una vez en dentro del bucle del *Timeout*, se procede a la lectura de la posición que es almacenada en la variable global *Actual linear actuator position (mm)*.

- Lectura de la temperatura de la placa enfriadora procedente del termistor proporcionado por el fabricante (una vez que se ha pulsado el botón *Start Selected Cycle*). Es utilizado para medir la temperatura de referencia con la que el controlador trabaja. Para ello es necesario utilizar las siguientes funciones de *LabVIEW*:

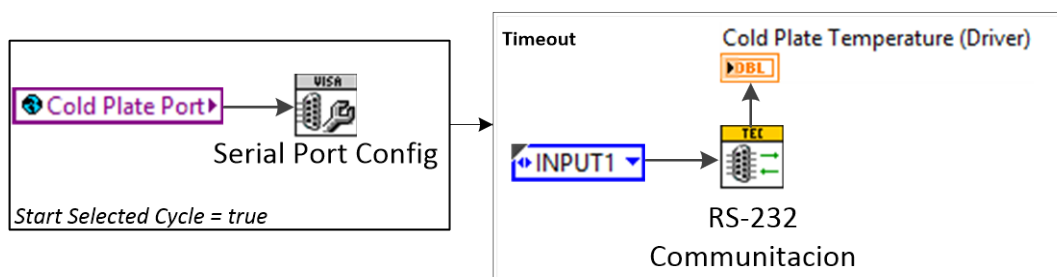


Figura 4.25 Esquema de las funciones utilizadas para representar la temperatura de la placa enfriadora

En primer lugar, se configura el puerto serie para establecer la comunicación con el controlador de la placa enfriadora mediante el subVI *Serial Port Config*. Una vez abierta la conexión se pueden enviar comandos al controlador de la placa, con ayuda del subVI *RS-232 Communication*. En este caso, el comando en cuestión es el denominado *INPUT 1* que se encarga de devolver una variable con la temperatura que capta el termistor de referencia de la placa en ese instante y lo almacena en la variable local *Cold Plate Temperature (Driver)*.

- Actualización de las demás variables representadas en el panel frontal, como el indicador de hora, el tipo de ciclo, la hora mínima y máxima de ejecución etc. Este proceso se realiza debido a la necesidad de que el usuario conozca en todo momento parámetros del ciclo que ha configurado y debe de ser consciente de las modificaciones que pueda haber realizado en éstos.

## 4.3 CONFIGURATION

### 4.3.1 PANEL FRONTAL

Cuando en el panel frontal de *Main* se pulsa el botón *Configuration*, se pone en marcha el evento que abre el subVI con el mismo nombre y en cuyo panel frontal se pueden configurar todos los parámetros necesarios para la ejecución de un ciclo largo determinado, dentro del menú *Cycle*, que es la que está seleccionada por defecto al abrir el subVI.

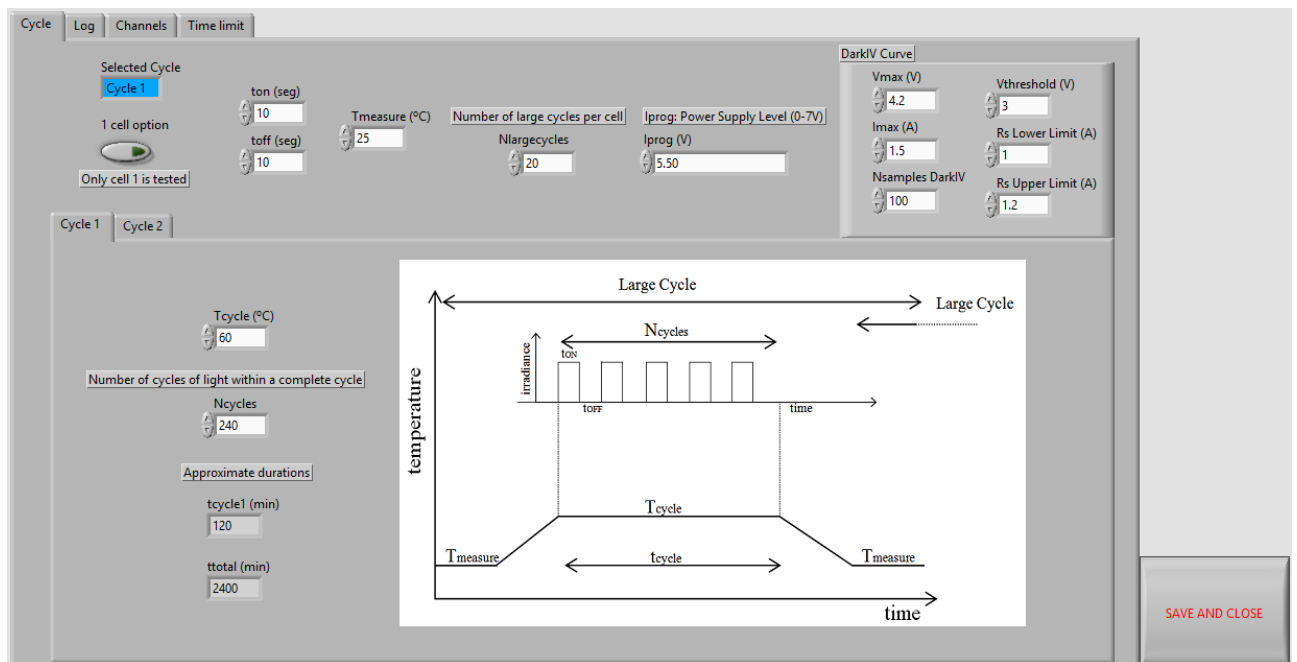


Figura 4.26 Panel frontal del subVI Configuration

### Cycle

En la parte superior del panel frontal se encuentran representados los parámetros que comparten los dos tipos de ciclo que puede llevar a cabo la máquina, estos son:

- 1 cell option

Marcando esta opción, solo se tiene en cuenta la célula número 1 a la hora de medir la curva IV en oscuridad y a la hora de representar y almacenar medidas en plena ejecución, tales como la temperatura en la placa de la célula,  $V_{OC}$  o  $I_{SC}$ . Como no será analizado el efecto del ciclado producido en la célula 2, será necesario removerla y/o cambiar la posición del actuador lineal asociada a ésta en el subVI *Monitoring and Cell Position Adjustment*, para así evitar que ésta se degrade y no se almacenen datos al respecto.

- ton y toff (seg)

Como ya se explicó en el primer capítulo, los ciclos de luz correspondientes a un tipo de ciclo térmico-luminoso determinado son definidos mediante estos dos parámetros medidos en segundos. Normalmente, *ton* y *toff* tendrán el mismo valor, pero en caso de que el usuario decida variar esta equivalencia habrá que tener en cuenta que estos tiempos están referenciados a la célula número 1, es decir, si *ton* tiene un valor de 5 segundos y *toff* de 3 segundos, significa que la célula 2 tendrá como *ton* 3 segundos y un *toff* de 5 segundos.

Además, es necesario tener en cuenta que estos valores se refieren al tiempo efectivo en el que el spot estará centrado en la célula correspondiente sin tener en cuenta el retardo que se produce en que éste se desplace de una célula a otra, que se estima en 5 segundos, como ya se indicó con anterioridad.

- Tmeasure (°C)

Parámetro para especificar la temperatura a la que se desea colocar la placa enfriadora (base de la célula) en el momento de medida de la curva IV en oscuridad.



- *Nlargecycles*

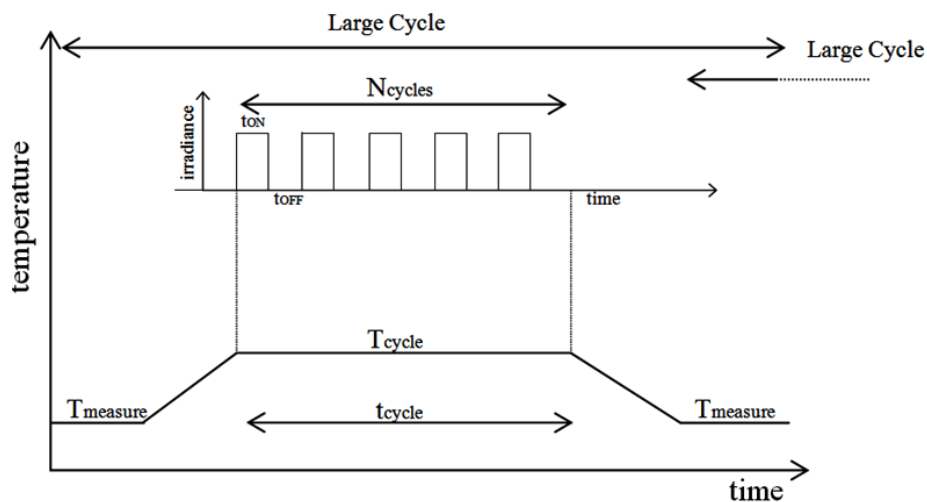
Configura el número de ciclos largos que se desean realizar, teniendo en cuenta que éste se compone de un ciclo térmico-luminoso y medidas de la curva IV en oscuridad antes y después de cada uno, como se indica en el esquema ya visto.

- *Iprog (V)*

Permite ajustar la potencia de salida (W) de la fuente de alimentación lámpara en función de los valores suministrados por ecuación  $P_{salida} (W) = 11.965 \cdot (I_{prog}(V))^2 + 46.255 \cdot I_{prog}(V) + 144.53$  que, como ya se sabe, proporciona la variación de la potencia de la lámpara frente a los valores de *Iprog (V)*.

- Parámetros de medida de curva IV en oscuridad que dependerán del tipo de célula a testear:
  - *Vmax (V)*: tensión de polarización (barrido) máxima de la célula.
  - *I<sub>max</sub> (A)*: corriente máxima permitida en la célula.
  - *Nsamples DarkIV*: número de muestras de la curva.
  - *Vthreshold (V)*: tensión umbral de célula (no de polarización) a partir de la cual, para evitar que ésta se sobrecaliente cuando comienza a emitir y varíe su curva en oscuridad, se realiza el siguiente proceso:
    1. Se polariza la célula al valor que corresponda dentro del barrido de tensión.
    2. Se almacena y se representa los valores de I y de V correspondientes en la curva IV en oscuridad.
    3. Se espera 1 segundo con la célula polarizada a 0 V, es decir, sin que ésta emita.
    4. Se calcula el siguiente valor de tensión de polarización y se vuelve al punto 1.
  - *Rs Lower Limit (A)* y *Rs Upper Limit (A)*: límite inferior y superior de corriente para el cálculo de la resistencia serie. Corresponde a los valores  $I_{min}$  e  $I_{max}$  explicados en el apartado 2.6.2.

**Cycle: Cycle 1**



The screenshot shows the 'Cycle 1' configuration menu. It contains the following parameters and their values:

- Tcycle (°C)**: 60
- Number of cycles of light within a complete cycle**: Ncycles = 240
- Approximate durations**:
  - tcycle1 (min)**: 120
  - ttotal (min)**: 2400

*Figura 4.27 Superior: Esquema de tiempos del ciclo 1. Inferior: Menú Cycle 1*

Como es lógico, en este menú se encuentran todos los parámetros restantes con los que se configura el ciclo de tipo 1:

- *Tcycle* (°C) : temperatura de ciclo, es decir, temperatura a la que la placa enfriadora debe de situar la base de la célula para que comience el ciclado de luz en ésta.
- *Ncycles* : número de ciclos de luz que componen el ciclo térmico-luminoso resultante.
- *tcycle1* (min) y *ttotal* (min): indican, respectivamente, duración aproximada de un ciclo térmico-luminoso y del conjunto total de ciclos largos programados sin tener en cuenta el tiempo que se tarda en medir las curvas IV en oscuridad, es decir, solo tiene en cuenta la duración de los ciclos térmico-luminosos.

### Cycle : Cycle 2

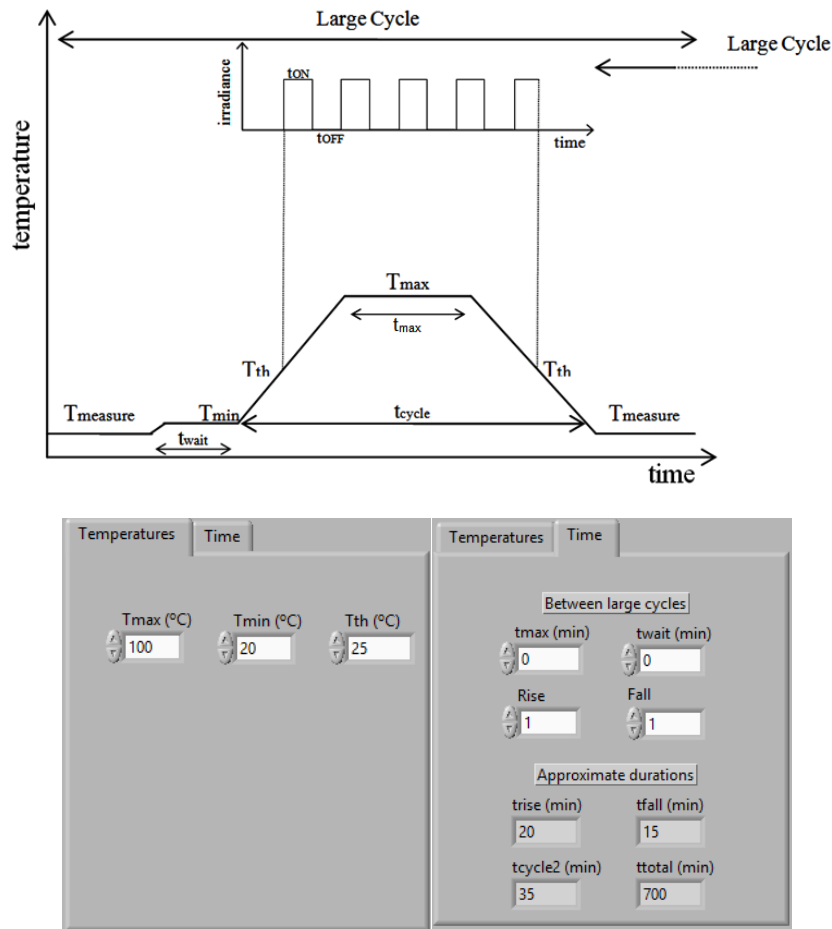


Figura 4.28 Superior: Esquema de tiempos del ciclo 2 . Inferior: Menú Cycle 2 (Izquierda: Temperatures; Derecha: Time).

Al igual que para el ciclo 1, en esta parte se pueden configurar los parámetros para el ciclo de tipo 2. En cuanto a parámetros de temperatura, se tienen los siguientes:

- $T_{max}$  (°C) : temperatura máxima del ciclo térmico.
- $T_{min}$  (°C) : temperatura mínima, es decir, temperatura a la que comienza la rampa de subida hacia  $T_{max}$ .
- $T_{th}$  (°C) : temperatura de encendido/apagado umbral. Cuando la placa enfriadora alcance esta temperatura en la rampa de subida hacia  $T_{max}$  se encenderá la lámpara. De la misma manera, cuando la vuelva a alcanzar en la rampa de bajada hacia  $T_{min}$  la lámpara se apagará.

Los parámetros de tiempo son los siguientes:

- $t_{max}$  (min) : establece el tiempo que se mantiene la placa a la temperatura máxima.

- *twait* (min) : tiempo de espera después de cada medida de la curva IV en oscuridad a temperatura *Tmin*. Por lo general, tendrá valor nulo a menos que el usuario desee modificarlo.
- *Rise*: selecciona el tipo de rampa de subida de temperatura, de entre 3 posibles. Además, *trise* indica la duración aproximada en minutos de cada tipo de rampa. El procedimiento de subida de temperatura será explicado más adelante.
- *Fall*: al igual que el anterior, el usuario puede elegir entre 4 tipos posibles de rampa de bajada de temperatura y *tfall* indica sus duraciones aproximadas.
- *tcycle2* (min): duración aproximada de un ciclo térmico-luminoso, es decir, es la suma de la duración de la rampa de subida (*trise*), *tmax* y la duración de la rampa de bajada (*tfall*).
- *ttotal* (min): duración aproximada del conjunto de ciclos largos programados sin tener en cuenta el tiempo que tarda el sistema en medir las curvas IV en oscuridad, es decir, solo tiene en cuenta la duración de los ciclos térmico-luminosos.

### Log

En este menú se configura el directorio donde se van a guardar los archivos donde se almacena la información en tiempo real relativa al ciclo que se está ejecutando, así como los valores de las curvas IV en oscuridad y otras opciones. Todo ello se almacena en ficheros *Excel*.

The screenshot shows the 'Log' configuration window. It includes a tabbed interface with 'Log' selected. The main area contains the following elements:

- Comments (cell type, etc.):** A text box containing 'Cell 1 = 8; Cell 2 = 7'.
- File Path:** A text box containing 'D:\Ecosole AI substrate\Cel 8 and 7\20140317' with a folder icon to its right.
- DarkIV file name:** A text box containing 'DarkIV'.
- Events file name:** A text box containing 'Events'.
- Temperature measurement time (seg):** A spin box set to '5'.
- Temperature monitoring file name:** A text box containing 'Temp'.
- Linear actuator position file name:** A text box containing 'Linear'.
- Voc file name:** A text box containing 'Voc'.
- Measurement type:** A dropdown menu showing 'Isc + Voc'.

Figura 4.29 Menú Log

Como puede observarse en la figura anterior, en esta parte del subVI se pueden configurar los siguientes elementos:

- *Comments*: en esta casilla se introducen los comentarios que se quieran incluir en el fichero destinado a almacenar las curvas IV en oscuridad.
- *File Path*: directorio donde se van a almacenar los ficheros.
- *DarkIV file name*: nombre del fichero para almacenar las curvas IV en oscuridad de ambas células. Además, añade un campo que contiene la temperatura de cada célula en el momento de la medida y otro conteniendo sus resistencias serie, tal y como se puede observar en la siguiente figura:

Dark IV file			
17/03/2014 13:39	Selected Cycle : Cycle 1		
17/03/2014 13:42	Start measurement		
Cell 1 DarkIV curve		Cell 2 DarkIV curve	
Cell 1 = 8; Cell 2 = 7			
Temperature 1 (°C) =	22.5	Temperature 2 (°C) =	23.3
Rs1 (ohm) =	0.298	Rs2 (ohm) =	0.23
Measure 1			
Vcell1[V]	Icell1[A]	Vcell2[V]	Icell2[A]
0.000322	0.000179	0.010891	0.000141
0.065073	0.000128	0.065607	0.000157
0.13285	0.000119	0.133248	0.000125
0.200721	0.000135	0.200905	0.000169
0.268959	0.000119	0.2697	0.000176
0.336656	0.000132	0.33723	0.000132
0.404129	0.000122	0.404524	0.000154
0.472033	0.000109	0.472544	0.000163
0.540048	0.000128	0.540232	0.000173
0.607983	0.000116	0.608427	0.000157

Figura 4.30 Captura parcial del archivo Excel que almacena los valores de curva IV en oscuridad de ambas células.

- *Events file name*: nombre del fichero para almacenar los eventos que se producen en tiempo real. En concreto, se almacenan datos relativos al comienzo y finalización del ciclo y de las medidas de las curvas IV en oscuridad, así como el estado de la lámpara. Además, en cada ciclo de luz se almacena el valor de la  $I_{sc}$  correspondiente a cada célula cuando está iluminada, así como la posición del espejo en cada momento. También tiene la función de indicar algún error que pudiera producirse, como el problema de la lámpara que se indicó anteriormente o en la posición del actuador lineal.

Events File			
Time	Event	Value	
17/03/2014 13:39	Selected Cycle : Cycle 1		
17/03/2014 13:39	DarkIV curve measurement start		
17/03/2014 13:40	DarkIV curve measurement cell 1 end		
17/03/2014 13:42	DarkIV curve measurement cell 2 end		
17/03/2014 13:50	Tcycle reached		
17/03/2014 13:50	LAMP ON		
17/03/2014 13:50	Mirror Right - Cell 1		
17/03/2014 13:50	Isc cell 1	-1.114057 A	
17/03/2014 13:50	Mirror Left - Cell 2		
17/03/2014 13:51	Isc cell 2	-1.073379 A	
17/03/2014 13:51	Mirror Right - Cell 1		
17/03/2014 13:51	Isc cell 1	-1.18919 A	
17/03/2014 13:51	Mirror Left - Cell 2		
17/03/2014 13:51	Isc cell 2	-1.103984 A	

Figura 4.31 Captura parcial del archivo Excel que almacena los eventos que se producen en tiempo real dentro de la ejecución de un determinado ciclo.

- *Temperature measurement time (s)*: indica el periodo con el que se van a almacenar los valores de temperatura de los 4 termopares asociados al módulo NI 9211.
- *Temperature monitoring file name* : nombre del fichero para almacenar los valores de temperatura mencionados en el punto anterior.

Temperature monitoring file				
17/03/2014 13:39	Selected Cycle : Cycle 1			
Time	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
17/03/2014 13:39	22.107648	23.705903	23.680837	23.859597
17/03/2014 13:39	22.144116	23.450961	23.555026	23.634961
17/03/2014 13:39	22.09344	23.056843	23.239726	23.179399
17/03/2014 13:39	22.149325	22.611934	22.767199	22.651699
17/03/2014 13:39	22.125645	22.133223	22.287133	22.175846
17/03/2014 13:39	22.138906	21.667102	21.813496	21.677526
17/03/2014 13:39	22.133696	21.41075	21.420702	21.390846

Figura 4.32 Captura parcial del archivo Excel para almacenar las temperaturas de cada termopar

- *Linear actuator position file name* : nombre del archivo Excel destinado a almacenar la posición del actuador lineal en cada movimiento del haz, una vez iniciado el ciclado de luz. Esta posición almacenada es la que proporciona el controlador mediante el comando *GET\_FEEDBACK* que ,

como ya se conoce, devuelve la posición actual del actuador medida gracias a su potenciómetro de realimentación propio.

Linear actuator position file	
Time	Value (mm)
17/03/2014 13:50	43.108504
17/03/2014 13:51	3.714565
17/03/2014 13:51	43.304008
17/03/2014 13:51	3.714565
17/03/2014 13:51	43.15738
17/03/2014 13:52	3.665689

Figura 4.33 Captura parcial del archivo Excel destinado a almacenar la posición del actuador lineal una vez que comienza el ciclado de luz.

- *Voc file name* : nombre del fichero para almacenar los valores de tensión de circuito abierto de cada célula una vez que el ciclado luz ha comenzado. Estas tensiones se miden cuando la célula en cuestión esté iluminada y, para asegurar que esta tensión se encuentra estabilizada, un segundo antes de que el haz cambie a la otra célula.

14/03/2014 11:09	Voc 1	2.977434 V		14/03/2014 11:10	Voc 2	2.964931 V
14/03/2014 11:10	Voc 1	2.981768 V		14/03/2014 11:10	Voc 2	2.970954 V

Figura 4.34 Captura parcial del archivo Excel destinado a almacenar las tensiones en circuito abierto de cada célula.

- *Measurement type* : selecciona el tipo de medida de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$  de entre tres posibles:
  - $I_{sc}$  : solo se medirá y almacenará en el fichero de eventos la  $I_{sc}$  de una o ambas células (dependiendo del valor de *1 cell option*).
  - $V_{oc}$  : solo se medirá y almacenará en el fichero correspondiente la  $V_{oc}$  de una o ambas células (dependiendo del valor de *1 cell option*).
  - $I_{sc} + V_{oc}$  : ambas medidas son almacenadas en los ficheros correspondientes.

### Channels

En este menú se establecen los diferentes canales físicos tanto del controlador de la placa enfriadora (*Cold Plate*), como del *CompactDAQ* que se van a utilizar en la ejecución del ciclo. Además, permite configurar el canal de medida de la curva IV en oscuridad de entre el de 2 A y el de 10 A.

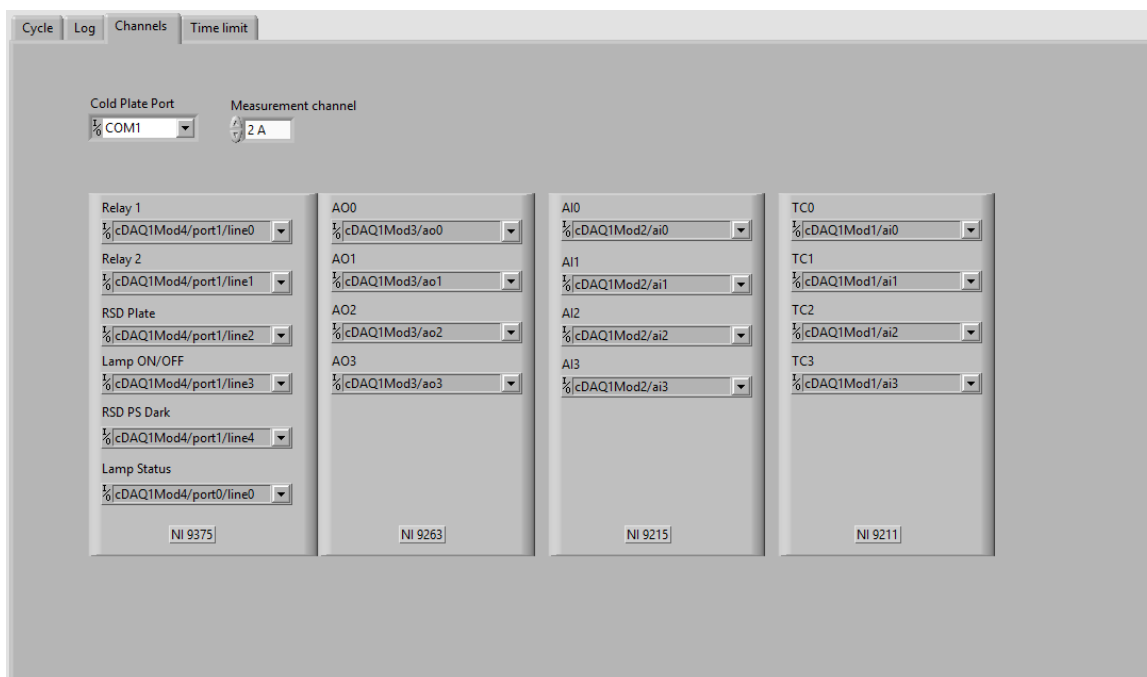


Figura 4.35 Menú Channels

### **Time limit**

Este menú permite activar y desactivar la limitación de tiempo de ejecución de la máquina explicada anteriormente, así como ajustar el rango horario de esta opción.

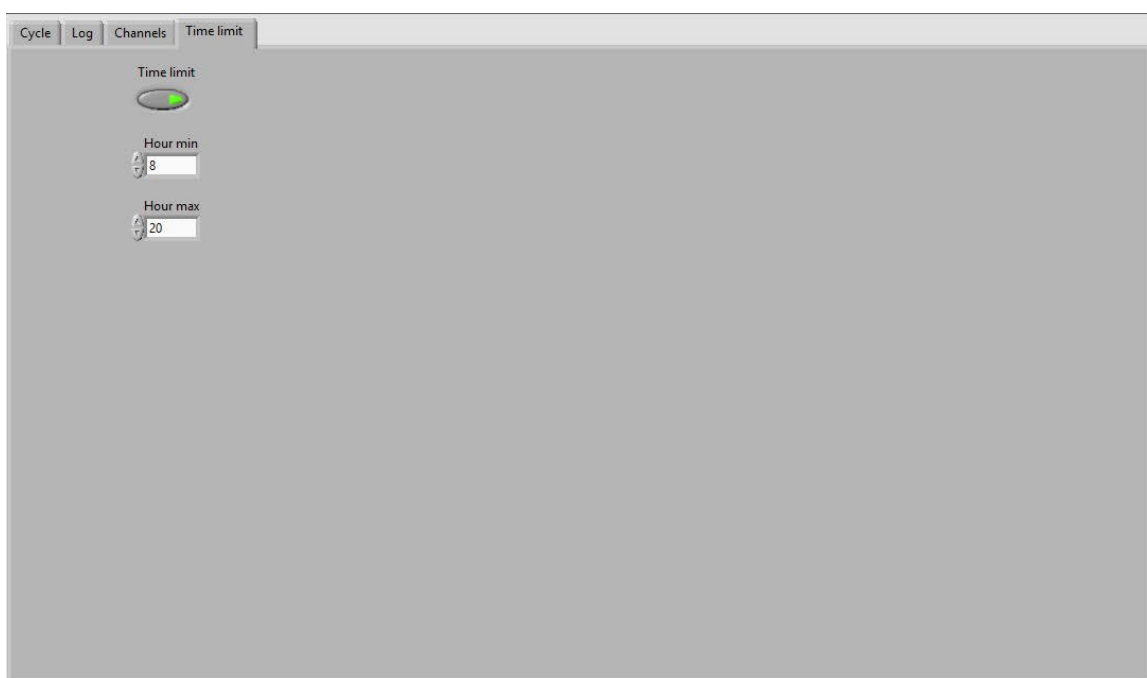


Figura 4.36 Menú Time Limit



### 4.3.2 ESTRUCTURA INTERNA

La estructura interna del subVI *Configuration* se compone de un bucle tipo *while*. Este bucle se encarga de actualizar todas las variables que se han comentado en el apartado anterior hasta que el usuario lo detenga pulsando el botón *SAVE AND CLOSE* del panel frontal. Una vez que esto ocurre se escriben las cabeceras de los archivos de logueo descritos anteriormente y se vuelve al panel frontal de *Main*.

## 4.4 MONITORING AND CELL POSITION ADJUSTMENT

### 4.4.1 PANEL FRONTAL

La función principal de este subVI es la de reajustar las posiciones por defecto del actuador lineal asociadas a cada una de las células, si fuera necesario. Esta necesidad de reajuste puede ser debida a un cambio en el tipo de célula a utilizar o simplemente por a variación en las posiciones de éstas y/o del secundario asociado a cada una.

Además, tiene la función de monitorizar la temperatura captada por los termopares, encender y apagar la placa enfriadora controlando su temperatura, encender y apagar la lámpara a una determinada potencia y medidas de parámetros como la  $V_{OC}$  y la  $I_{SC}$  de cada una de las células.

#### Adjusting

Al pulsar el botón *Monitoring and cell position adjustment* en el panel frontal de *Main* se abre el panel frontal del subVI correspondiente que muestra por defecto el menú *Adjusting*, que, como su propio nombre indica, permite ajustar las posiciones del actuador lineal asociadas a cada célula teniendo en cuenta una serie de parámetros que se explicarán más adelante.

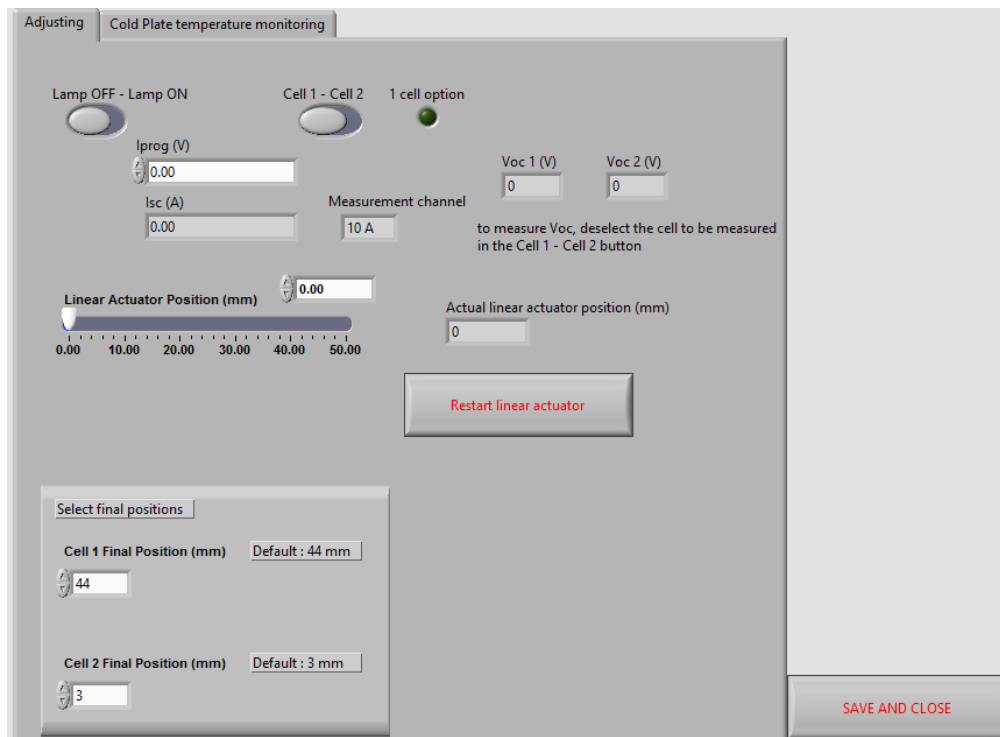


Figura 4.37 Menú Adjusting

Teniendo en cuenta la figura anterior el procedimiento de ajuste de posiciones de cada célula se realizaría de la manera siguiente:

1. Mediante el conmutador *Lamp OFF - Lamp ON* se procede a encender la lámpara. El actuador se encuentra extendido en su longitud media (por defecto) al comenzar el programa, como se observaría en el indicador *Actual linear actuator position* (mm), que marcaría un valor de unos 25 mm, situado en la parte derecha del menú. Por tanto, el spot se encuentra en medio de las células en situación inicial.
2. Se configura la potencia de salida de la lámpara deseada mediante el control *lprog* (V).
3. En el control *Linear actuator position* (mm) se inserta la posición por defecto correspondiente a la célula 1 (44 mm según la figura anterior).
4. Como el usuario conoce las características de la célula a testear, tal como la  $I_{SC}$  correspondiente para una concentración de 1 Sol, es sencillo ajustar la concentración deseada conociendo el valor de  $I_{SC}$  que se está produciendo a esa potencia específica. Hay que tener en cuenta que el conmutador entre células debe de estar en la posición *Cell 1* para medir  $I_{SC}$  ya que de lo contrario la célula estaría en circuito abierto.
5. Si al realizar los pasos anteriores el valor de  $I_{SC}$  no es el esperado, el usuario puede optar por probar diferentes valores de posición para la célula, variar la potencia de salida de la lámpara o mover físicamente el secundario o la célula correspondiente hasta obtener el valor deseado para una posición concreta del actuador lineal.
6. Se repiten los pasos anteriores para la célula número 2.
7. Si es necesario un cambio en las posiciones finales del actuador lineal, se indican en la parte inferior del menú en el apartado *Select final positions*.

Es necesario indicar que, según se ha podido experimentar, al encender la lámpara de arco de xenón produce un ruido impulsivo que hace que el actuador lineal pierda la comunicación con el controlador. Este suceso se da cuando en el indicador correspondiente a la posición actual del actuador muestra continuamente un valor nulo. En este caso, el programa lanzaría un aviso que indicaría el error.

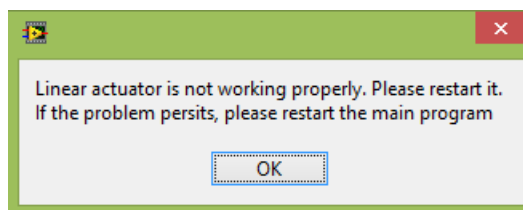


Figura 4.38 Ventana de error en el actuador lineal

Para solventar este problema sería necesario reanudar la conexión correspondiente pulsando el botón denominado *Restart linear actuator*, que se encargaría de cerrar la sesión USB correspondiente y, acto seguido, abriría una nueva. Si éste persiste, sería necesario reiniciar el programa principal.

### Cold Plate temperature monitoring

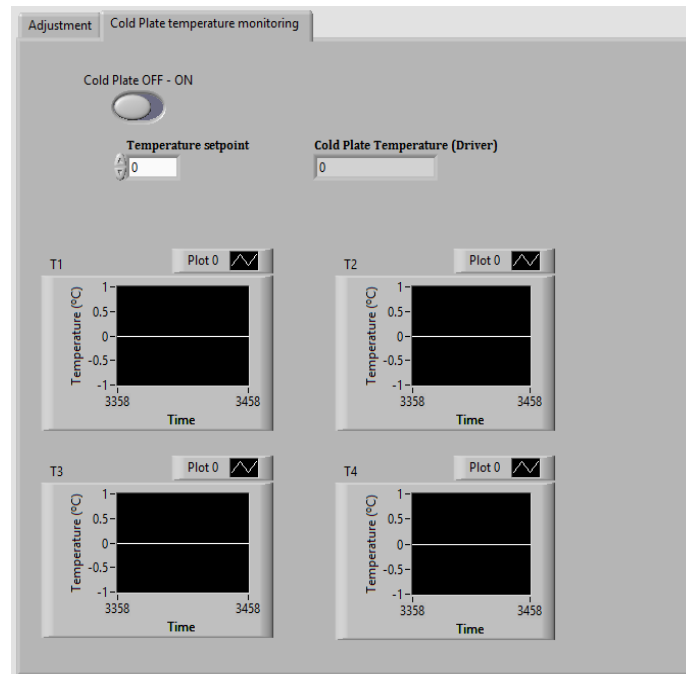


Figura 4.39 Menú Cold Plate temperature monitoring

Como puede observarse en la figura, en este menú el usuario puede controlar el apagado y encendido de la placa enfriadora, así como controlar su temperatura consigna y monitorizar su temperatura actual. Además, se muestran gráficamente las temperaturas captadas por los termopares asociados al módulo NI 9211.

#### 4.4.2 ESTRUCTURA INTERNA

Este subVI se compone de nuevo de una estructura de eventos dentro de un bucle *while* donde en el evento *Timeout* se encuentran las señales que se leen de forma continua y estas son:

- Lectura de la posición actual del actuador lineal: lectura de la variable global *Actual linear actuator position* (mm) que se actualiza dentro del VI principal *Main*.
- Lectura de las variables globales que contienen la temperatura procedente de cada uno de los termopares del módulo NI 9211 actualizadas también dentro del VI principal.
- Lectura de las señales de  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  procedentes de cada célula. Para la lectura de la  $V_{OC}$  de cada célula existe un canal exclusivo para cada una, ya que en este caso la medida de la señal se realiza en bornes de la célula y se pasa directamente al módulo NI 9215. Sin embargo, para la medida de la  $I_{SC}$  existe un solo canal (el de 2 A o el de 10 A) para ambas células que serán seleccionadas por el relé *Cell 1 - Cell 2*, como se indicó en el capítulo anterior. El procedimiento de medida de ambas señales se realiza de la siguiente manera:

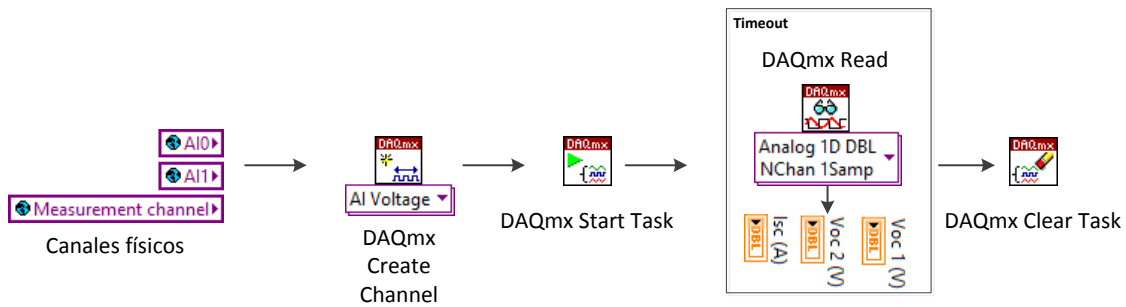


Figura 4.40 Esquema de las funciones utilizadas para medir  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$  de cada célula.

De la misma manera que en apartados anteriores: se crea la tarea de lectura de tensión que contiene los canales físicos (AI0 y AI1 para medir  $V_{OC}$  de cada célula respectivamente y *Measurement Channel* para  $I_{SC}$  y depende de si se utiliza el canal de 10 A o el de 2 A), se inicia la tarea y en el *Timeout* se leen las señales y se muestran en los indicadores del panel frontal.

- Lectura de la temperatura de la placa enfriadora por el mismo método que en VI principal *Main*.
- Lectura de las demás variables globales que entran en juego en este subVI: *1 cell option* y *Measurement channel*.

Los demás eventos de la estructura son los siguientes:

- *Temperature setpoint* : cuando el valor del control con el mismo nombre cambia, se envía el valor como temperatura consigna al controlador de la placa enfriadora.

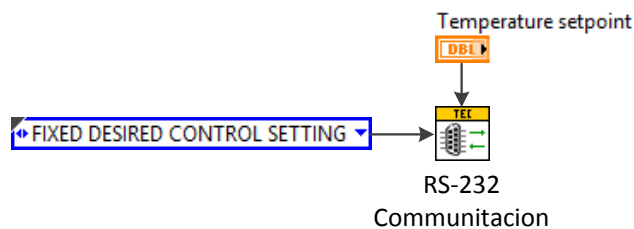


Figura 4.41 Esquema de las funciones necesarias para enviar la orden de temperatura consigna a la placa

Como puede observarse, el procedimiento es el de enviar el comando *FIXED DESIRED CONTROL SETTING* junto a la temperatura consigna deseada.

- *Cell 1 - Cell 2* , *Cold Plate OFF - ON* y *Lamp OFF - Lamp ON*: cierra o abre el relé correspondiente siguiendo un esquema similar al que se lleva a cabo para leer el estado de la lámpara salvo que se utilizan salidas digitales y no de entrada.

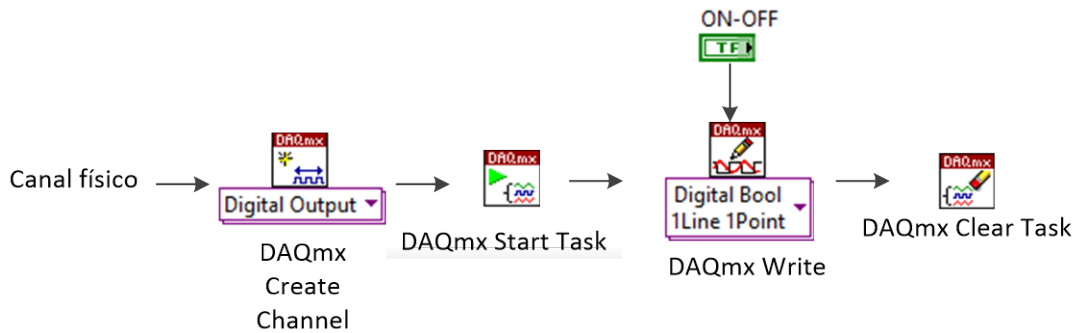


Figura 4.42 Esquema de funciones que se utilizan para abrir y cerrar relés

El usuario conoce los canales físicos destinados a cada tarea, así que el método de envío consiste en crear la tarea con los canales digitales de salida, activarla, escribir el valor *ON-OFF* correspondiente y, finalmente, limpiarla.

- *Linear actuator position* (mm): con la sesión USB ya establecida, cuando cambia su valor, éste se envía como la posición del actuador lineal deseada.

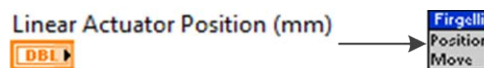


Figura 4.43 Esquema de funciones utilizadas para enviar la posición deseada al actuador lineal

Cuando se envía la orden de cambiar la posición del actuador lineal, se espera 1 segundo y se comprueba si el valor del indicador *Actual linear actuator position* (mm) es diferente de cero, ya que si tuviera valor nulo significaría que se ha perdido la comunicación con el controlador del actuador y se mostraría la ventana de error que se ha explicado en el apartado anterior.

- *Restart linear actuator position* : si se ha producido un error con la comunicación con el actuador lineal, se pulsa este botón que cierra la sesión USB actual y vuelve a iniciar otra estableciendo de nuevo los parámetros del actuador, como su longitud, velocidad, etc.
- *SAVE AND CLOSE*: vuelve a poner los relés en posición de reposo y guarda las variables que contienen las posiciones finales asociadas a cada célula en las variables globales que se utilizan para realizar el ciclo.

## 4.5 START SELECTED CYCLE

### 4.5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El evento *Start Selected Cycle* es el evento de mayor volumen dentro del programa principal *Main* ya que es el encargado de, una vez establecida la configuración, realizar todas las tareas necesarias para la realización de un tipo determinado ciclo.

Está compuesto de una máquina de estados general que se puede esquematizar de la siguiente manera:

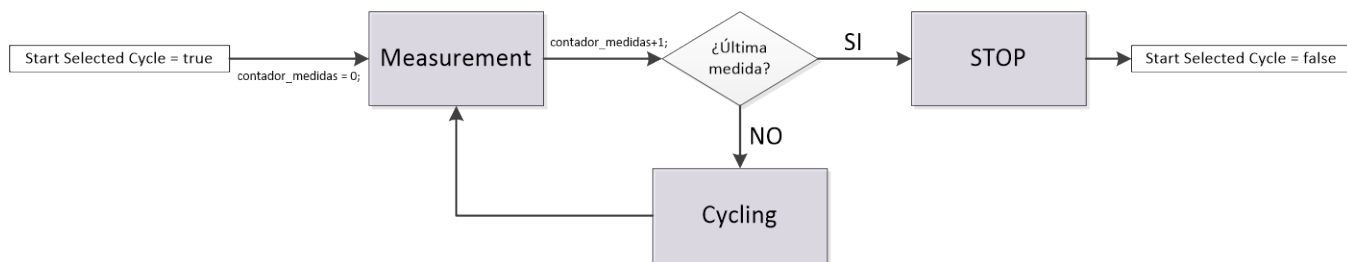


Figura 4.44 Esquema de funcionamiento del evento Start Selected Cycle

Como indica la figura anterior, una vez que se pulsa el botón *Start Selected Cycle* en el panel frontal de *Main* se procede a la medida de la/s curva/s IV en oscuridad dentro del estado *Measurement*. Una vez que se realiza esta medida, se comprueba que ésta no sea la última medida que debe de realizarse. En caso negativo, se procede a realizar el ciclo térmico-luminoso que se haya configurado con anterioridad. La variable *contador\_medidas* se compara en relación al número de ciclos largos que se haya establecido en *Configuration*, siendo esta relación  $\text{contador\_ciclos\_largos} = \text{contador\_medidas} - 1$ .

Para poder realizar una máquina de estados en *LabVIEW* se debe de utilizar la función *Case structure* insertada dentro de un bucle *while*. Este bucle tendrá un registro de desplazamiento (*shift register*) con la tarea de actualizar el estado siguiente de la máquina.

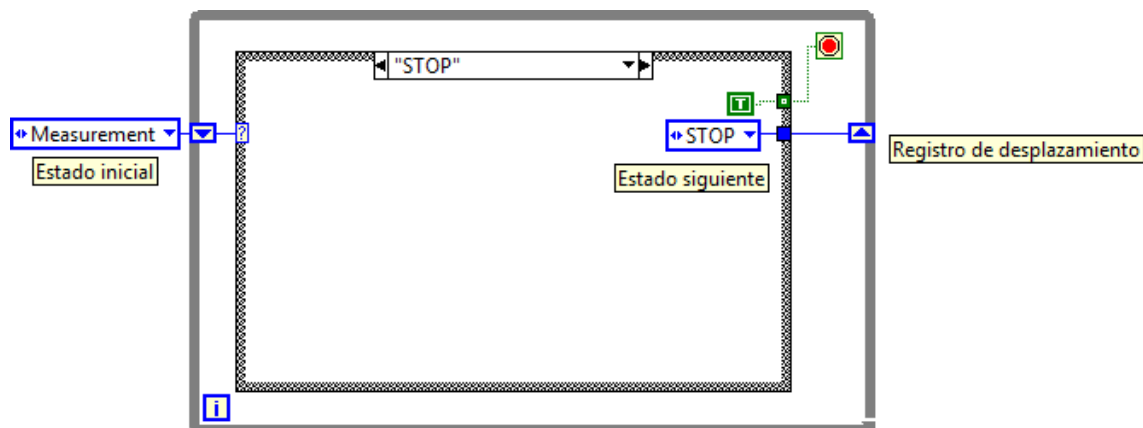


Figura 4.45 Esquema simplificado de la máquina de estados del evento Start Selected Cycle

Los estados *Measurement* y *Cycling* están compuestos por otras máquinas de estados que se describen en los siguientes apartados.

#### 4.5.2 MEASUREMENT

Como su propio nombre indica, este estado compone todas las acciones necesarias para la medida de la curva IV en oscuridad a una determinada temperatura especificada por el usuario.

El diagrama de estados esquematizado para este evento se muestra a continuación:

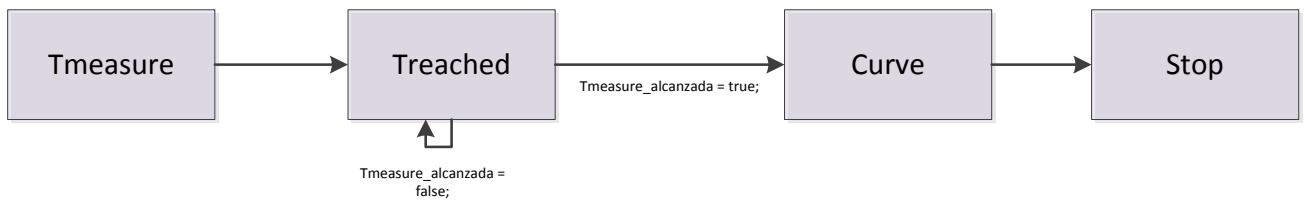


Figura 4.46 Esquema de la máquina de estados de Measurement

Como puede observarse en la figura anterior, esta máquina se compone de 4 estados.

### Tmeasure

Este estado es el encargado de, entre otras cosas, establecer *Tmeasure* como temperatura consigna de la placa enfriadora. Los pasos que se llevan a cabo en esta parte del programa son los siguientes:

1. Encender la placa activando su correspondiente relé
2. Se establecen los siguientes parámetros de configuración del controlador:
  - *CONTROL TYPE* = 1. Control PID.
  - *PROPORTIONAL BANDWIDTH* = 0.5. Ancho de banda proporcional de 0.5 °C.
  - *HEAT MULTIPLIER* = 0.5. Multiplicador de calentamiento al 50% para evitar que la placa se caliente con demasiada rapidez.
  - *COOL MULTIPLIER* = 1. Multiplicador de enfriamiento al 100%, ya que, en general, es más forzoso enfriar que calentar.
  - *FIXED DESIRED CONTROL SETTING* = *Tmeasure*. Temperatura consigna igual a la temperatura de medida configurada por el usuario.

Una vez enviados estos parámetros se pasa al estado *Treached*.

### Treached

En este estado se utiliza el *ExpressVI* denominado *= to within Tolerance* que se utiliza para comprobar que una variable (la temperatura de la placa enfriadora) se encuentra dentro de un rango especificado por una tolerancia en torno a una constante (la temperatura de medida deseada). Si la temperatura actual de la placa entra dentro de este rango se pasa al siguiente estado *Curve*, donde se procede a medir la curva IV en oscuridad. La tolerancia en la máquina LYSS se fija en  $\pm 0.5$  °C en torno a la temperatura deseada.

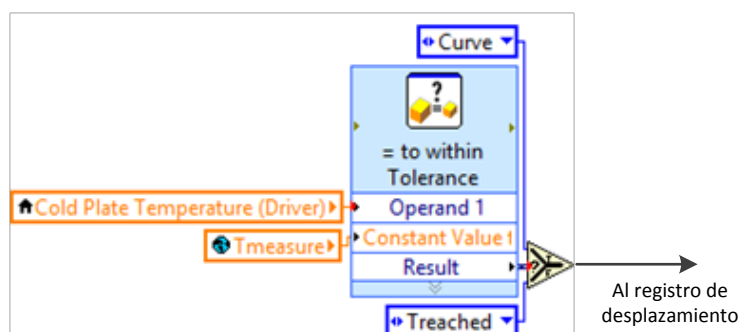


Figura 4.47 Esquema de utilización del Express VI denominado *= to within Tolerance*

Antes de pasar al siguiente estado, se apaga la placa enfriadora desactivando el relé correspondiente. Esto es debido a que el hecho de que la placa esté encendida durante la medida de la curva IV en oscuridad puede alterar las medidas tomadas de los parámetros V e I, ya que ésta produce un cierto ruido.

## Curve

En primer lugar, para poder realizar la medida de la curva IV en oscuridad es necesario activar el relé 2 (ver esquema de medida de la curva IV en condiciones de oscuridad del apartado 3.3.5.2), que es el que conmuta entre la fuente de alimentación que realiza el barrido en tensión de la célula (terminal normalmente abierto) y cortocircuito (terminal normalmente cerrado).

Como ya se ha explicado anteriormente, el proceso de medida de la curva IV en oscuridad consiste en realizar un barrido en tensión en la célula. En cada punto de polarización en tensión, se almacena el valor de la caída resultante de corriente y tensión en ella. Cuando la medida de tensión en la célula supera un cierto umbral controlable por el usuario, se comienza a esperar un segundo con la célula polarizada a un valor nulo de tensión después de polarizarla al valor correspondiente en ese momento.

El número de puntos que se quieren representar en la curva IV en oscuridad es configurable mediante el parámetro *Nsamples DarkIV* del subVI *Configuration*. Este número es tenido en cuenta a la hora de realizar el barrido en tensión, ya que determina el aumento en tensión en cada punto de polarización.

Para cada punto de polarización se deben de realizar una serie de tareas que se muestran en el siguiente esquema:

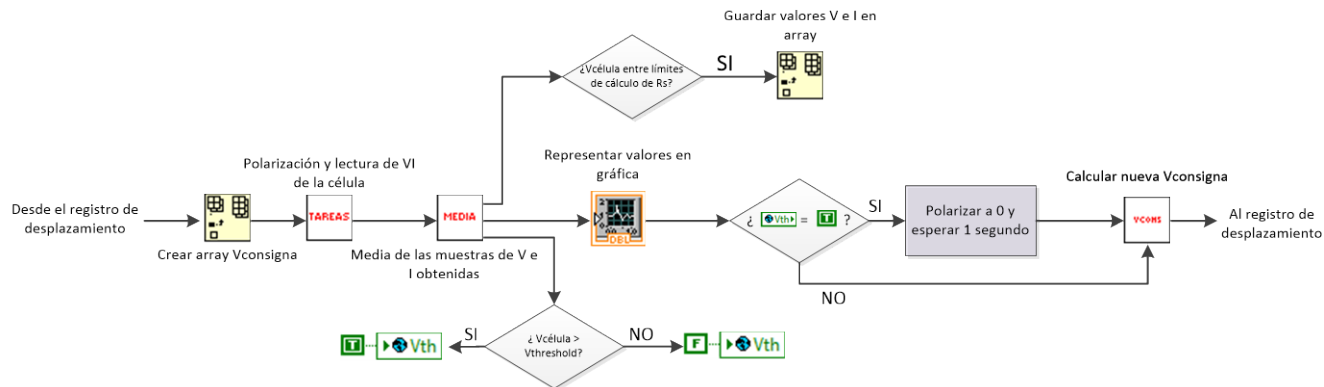


Figura 4.48 Esquema de medida de un punto en la curva IV en condiciones de oscuridad.

Según el esquema anterior, para medir cada punto de la curva IV en oscuridad se debe comenzar creando un array con el valor de *Vconsigna* (de polarización) calculada en ese momento. Este array es de 20 elementos, todos ellos con el mismo valor *Vconsigna* calculado. Esto se debe a que en el siguiente subVI, *TAREAS*, se polarizará la célula (utilizando las funciones *DAQmx* que se explicaron anteriormente) configurando la salida analógica para un solo canal pero para N muestras, que aseguran que la tensión de polarización es la deseada en todo momento.

Como es lógico el primer valor del registro de desplazamiento de *Vconsigna* será nulo e irá aumentando sucesivamente en cada punto.

El siguiente paso es el de realizar la polarización de la célula y sucesivamente, medir los valores de V y de I proporcionados por ésta. Esto se lleva a cabo en el subVI *TAREAS*, siguiendo un esquema similar al siguiente:



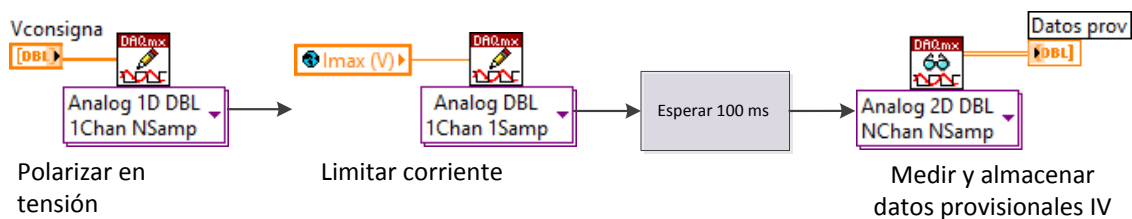


Figura 4.49 Esquema simplificado del proceso de polarización de la célula

En cada punto de polarización se miden 20 muestras de tensión y corriente de célula en voltios con una tasa de muestreo de 500 muestras/segundo. Estos datos se guardan de forma provisional en arrays de 20 elementos.

En este momento se calcula la media de las 20 muestras obtenidas de corriente y de tensión en voltios. Se multiplica la media de la corriente por la constante del canal de medida utilizado (2 A o 10 A, ver Figura 3.63) y se representa el punto ( $V_{\text{CÉLULA}}$  (V),  $I_{\text{CÉLULA}}$  (A)) en la gráfica correspondiente del panel frontal de *Main*. Además, en este punto del proceso se realizan un par de comparaciones:

- Si el valor medio de tensión calculado ( $V_{\text{CÉLULA}}$ ) a partir de las 20 muestras se encuentra dentro de los límites de medida de la resistencia serie (configurados como *Rs Lower Limit* (A) y *Rs Upper Limit* (A)) se almacenan en un array los correspondientes valores de  $V_{\text{CÉLULA}}$  (V) y de  $I_{\text{CÉLULA}}$  (A) para un cálculo posterior de la resistencia serie.
- De la misma manera, si este valor es mayor que el valor *Vthreshold* (V) configurado, la variable *booleana Vth* se establece a valor verdadero. De lo contrario, se establece un valor falso.

A continuación, se comprueba el valor de *Vth* y si éste es verdadero se procede a esperar 1 segundo con polarización nula después de cada punto de medida. Si no, se pasa al cálculo de la *Vconsigna* actualizada.

Esta nueva *Vconsigna* se calcula teniendo en cuenta la *Vconsigna* actual, el número de puntos de la curva y la tensión máxima de polarización de la célula. En cada punto, se realiza un aumento de valor constante en esta tensión consigna hasta que la tensión de polarización alcanza el valor de dos tercios la tensión máxima configurada, *Vmax* (V), momento en el que este aumento pasa a tener un valor de un 75% menos. Con este método se consigue una mayor resolución de la curva cuando la célula comienza a emitir.

Este proceso se realiza para ambas células (a menos que se tenga activada la opción de testear una sola célula) con el simple hecho de cambiar el relé 1 de una posición a otra. Además, permite medir esta curva para los dos canales de medida instalados, el de 2 A y el de 10 A.

### Log y cálculo de resistencia serie

Una vez finalizada la medida o medidas de la curva, se almacenan los valores de V, I, Rs y temperatura de la célula en el fichero *Excel* correspondiente.

Para el cálculo de la resistencia serie se calcula el ajuste lineal de las muestras de V y de I que entran dentro del rango especificado para el cálculo. En *LabVIEW* se calcula con el VI *Linear Fit*.

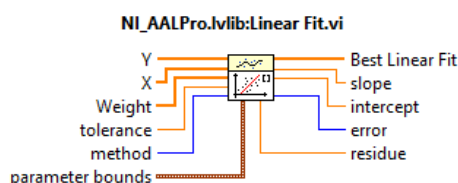


Figura 4.50 VI Linear Fit

En este VI proporciona la pendiente (*slope*) de la recta de ajuste calculada. El valor calculado se invierte y se obtiene una aproximación de la resistencia serie en ese rango.

### Temperatura de medida

Tal y como se explicó en el capítulo 2, lo ideal es que durante la medida de la curva esta temperatura sea constante, lo que será imposible si se deja de alimentar la placa. Aunque para variaciones pequeñas de temperatura, el efecto en el cálculo de la aproximación de la resistencia serie es ínfimo.

Para asegurar que el procedimiento es correcto, se realiza un experimento de medida de la variación la temperatura de la célula cuando se deja de alimentar la placa.

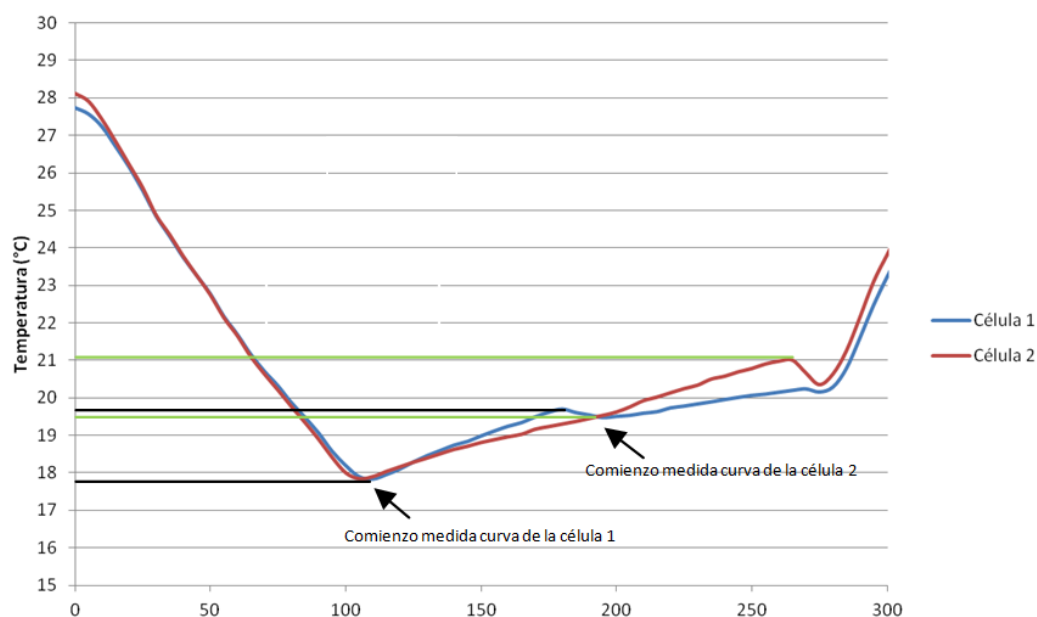


Figura 4.51 Gráfica que muestra la temperatura en cada célula en el momento en el que se realiza la medida

En la figura anterior se observa que para ambas medidas de curva IV en oscuridad se obtiene una variación de temperatura de menos de 2°C debida a la inercia térmica de la placa enfriadora cuando ésta se desconecta en el instante de comienzo de la medida. Con esta variación el efecto producido en la curva IV es descartable, por lo tanto se puede suponer que todas las medidas de las curvas de oscuridad se realizan siempre a una temperatura constante en cada célula.

### 4.5.3 CYCLING

El estado *Cycling* comienza comprobando si la hora actual del sistema se encuentra dentro del rango delimitado por *Hour min* y *Hour max*. Además, también comprueba si la duración del ciclo térmico-luminoso a realizar no supera la hora especificada por *Hour max*. Si se cumplen estos dos requisitos, se procede a la ejecución del ciclo determinado, que puede ser el Ciclo 1 o el Ciclo 2, según lo que el usuario haya configurado con anterioridad. Además, el relé 2 se deja en la posición de reposo (posición de cortocircuito de la célula) para que la corriente que fluye a través de la célula cuando ésta se encuentra iluminada no pase por la fuente de alimentación que se encarga del barrido en tensión anterior.

Otra función importante que se realiza al principio de este estado es la de poner a cero el contador de error de posición. Este contador almacena el número de errores que se puedan producir en las posiciones del actuador lineal asociadas a cada célula. El margen de error es de 3 mm, es decir, si la posición real del actuador se diferencia en más de 3 mm con la posición teórica se produce el error.

Este contador de errores se lee continuamente en el bucle secundario de *Main* y si, en algún momento, este valor llega a ser de 5 errores o más se detiene el ciclo largo y alerta al usuario con un mensaje de error y lo notifica también en el fichero de eventos.

#### 4.5.3.1 CICLO 1

El ciclo 1 mantiene una temperatura constante en la placa, y por lo tanto, en la base de la célula durante todos los ciclos de luz. En cuanto a la estructura interna de programación, este ciclo se compone de una máquina de estados que sigue el siguiente esquema:

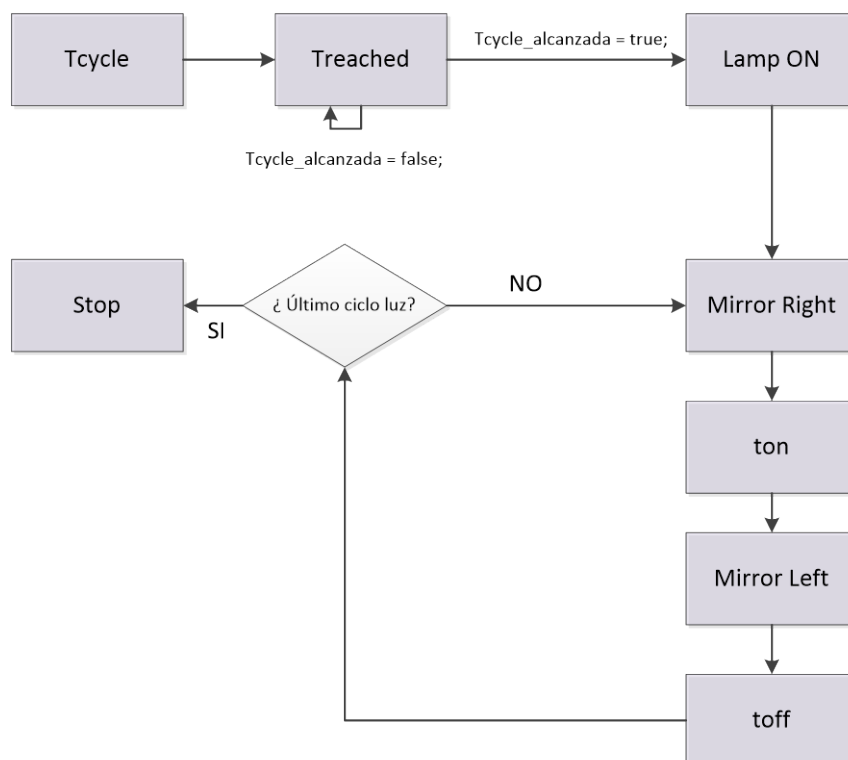


Figura 4.52 Esquema de estados de la implementación del Ciclo 1

### Tcycle

En este estado se establece *Tcycle* como temperatura consigna de la placa enfriadora, sin embargo los demás parámetros del controlador se mantienen con el mismo valor.

### Treached

En este estado se vuelve a hacer uso del *ExpressVI* denominado *=to within Tolerance* para comprobar en cada iteración si la temperatura actual de la placa enfriadora entra dentro del rango especificado por la tolerancia de  $\pm 0.5$  °C en torno a *Tcycle*.

### Lamp ON

Cuando la temperatura de ciclo es alcanzada se procede a encender la lámpara activando el relé correspondiente, en este caso es el denominado relé 4 que se activa con la salida *DO3* del módulo *NI 9375* utilizando las funciones *DAQmx* ya explicadas.

### Mirror Right

Cuando el espejo gira hacia la izquierda significa que gira hacia la posición de la célula 1. Para ello el actuador lineal debe moverse hacia la posición especificada para esa célula. Se utiliza el VI *Position Move* para la comunicación con el controlador del actuador, como ya se explicó anteriormente.



Figura 4.53 Esquema del proceso de movimiento del actuador a la posición de la célula 1

Además, se incrementa el contador de ciclos luz (o también denominados ciclos cortos) en una unidad.

### ton

La función general de este estado es la de esperar el tiempo *ton* determinado por el usuario con el haz focalizado en la célula 1. En realidad el tiempo de espera, tanto para *ton* como para *toff* es de 5 segundos más de lo que el usuario ha especificado, ya que se conoce que el actuador tarda aproximadamente ese tiempo en desplazarse de su posición mínima a su posición máxima configurado a una velocidad del 100% (Ver figura 4.55).

El *Express VI* que se utiliza para esperar este tiempo es el denominado *Elapsed Time*.

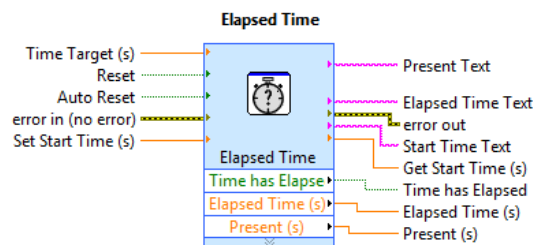


Figura 4.54 Elapsed Time

En *Time Target (s)* se inserta el parámetro *ton* (más los 5 segundos de retardo) y cuando la salida *Time has Elapsed* proporciona un valor verdadero (el tiempo ha sido transcurrido), se procede a pasar al siguiente estado, *Mirror Left*.

Durante esta espera, se realizan otras funciones que se detallan a continuación:

- Medida de  $I_{SC}$  de la célula 1 cuando ha transcurrido la mitad del ciclo de luz, es decir,  $ton/2 + retardo$ .

En primer lugar, es necesario establecer la posición del relé 1 que corresponde a la célula 1 (terminal normalmente cerrado) mediante el canal *DO0* del módulo *NI 9375*, con la ayuda de las funciones proporcionadas por *DAQmx*.

Después, se crea una tarea de entrada de tensión analógica con el canal correspondiente (canal de 2 A o de 10 A, *A12* y *A13*, respectivamente), se toman 100 muestras a 200 muestras/segundo y, finalmente, se calcula la media de éstas.

- Medida de la  $V_{OC}$  de la célula 1, un segundo antes de que acabe el ciclo de luz. Para esta medida es necesario cambiar el relé 1 de posición a la posición correspondiente a la célula 2 (terminal normalmente abierto), para que la célula 1 se quede en circuito abierto.

Acto seguido, se genera otra tarea analógica de tensión entrada con el canal *A10*, que se encuentra conectado directamente en bornes de la célula. Se mide el mismo número de muestras que para la  $I_{SC}$  y a la misma tasa de muestreo, después se realiza la media de éstas.

Como ya se conoce, el valor de estos parámetros se mide y se almacena en los ficheros *Excel* de eventos (para  $I_{SC}$ ) y de  $V_{OC}$  si se ha activado la opción correspondiente.

- En el mismo instante de medida de la  $V_{OC}$  se compara la posición actual del actuador lineal (variable global *Actual linear actuator position* (mm)) con la posición que realmente se debería de tener (variable global *Cell 1 Final Position*) y si estas difieren en más de 3 mm se escribe un mensaje de error de posición en el fichero de eventos y se incrementa el contador de errores de posición en una unidad.

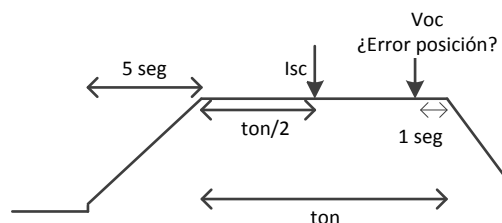


Figura 4.55 Representación de las medidas realizadas en un ciclo de luz

### **Mirror left**

Se procede de la misma manera que en el estado *Mirror Right* pero cambiando la posición del actuador atendiendo al valor de la variable global *Cell 2 Final Position*.

### **toff**

Procedimiento idéntico al del estado *ton* cambiando las variables de tiempo, canales de medida de  $V_{OC}$  (*A11*) y las posiciones del relé 1.

En este estado se comprueba si el contador de ciclos cortos es igual al total de ciclos cortos a realizar. Si sus valores coinciden se pasa al estado **Stop**, que parará el bucle que contiene la máquina de estados. Después, según la máquina de estados principal, se pasará al estado *Measurement*, donde se realizará la medida de la curva IV en oscuridad.

#### 4.5.3.2 CICLO 2

En el ciclo del tipo 2 la temperatura de la placa enfriadora varía con una pendiente específica desde una temperatura mínima ( $T_{min}$ ) a una temperatura máxima ( $T_{max}$ ), a la que quedará fija durante un tiempo específico  $t_{max}$ . Cuando, en la rampa de subida de temperatura, la placa llega a una temperatura umbral denominada  $T_{th}$  se enciende la lámpara y comienza el ciclado de luz. De la misma manera, cuando en la rampa de bajada de temperatura vuelve a pasar por ese punto térmico, la lámpara se apaga. Cuando se vuelve a llegar a  $T_{min}$  se procede a pasar al estado *Measurement* de la máquina de estados principal donde se mide la curva IV en oscuridad a la temperatura  $T_{measure}$ .

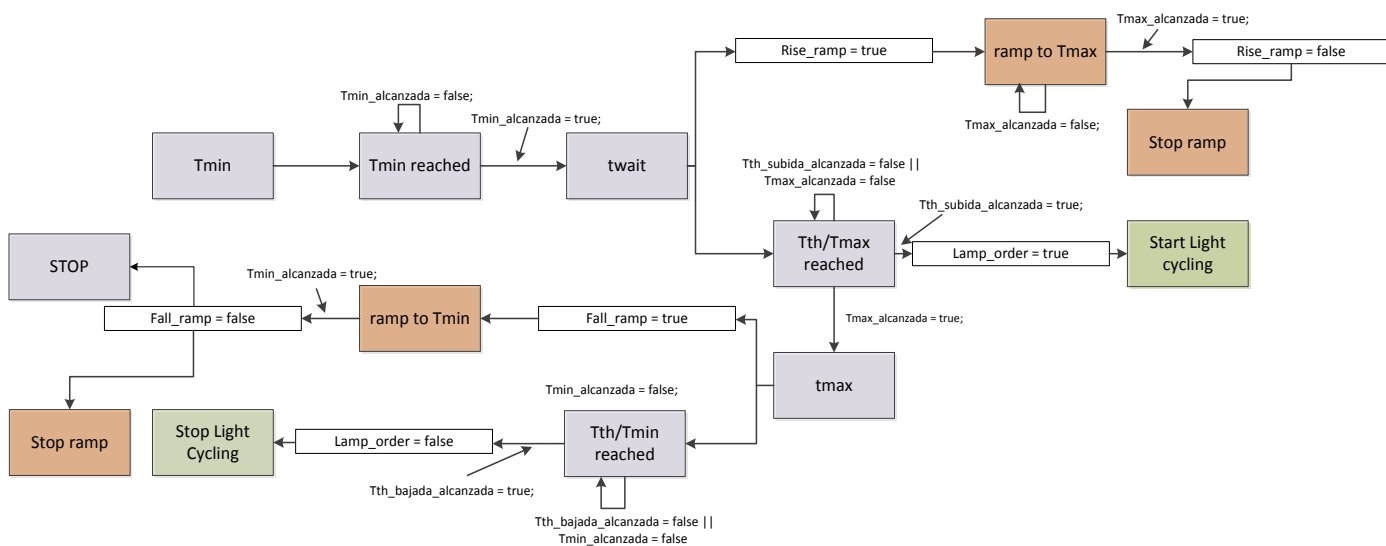


Figura 4.56 Esquema de la máquina de estados para la realización del ciclo de tipo 2

#### **$T_{min}$**

En este estado se establece la temperatura mínima configurada,  $T_{min}$ , como temperatura consigna en el controlador de la placa enfriadora. Los demás parámetros mantienen el mismo valor.

#### **$T_{min}$ reached**

En este estado se espera hasta que se alcanza esta temperatura mínima, es decir, hasta que la temperatura actual de la placa enfriadora entra dentro del rango en torno a  $T_{min}$  delimitado por la tolerancia de  $\pm 0.5$  °C. Cuando lo anterior se cumple, se pasa al estado *twait*. Se utiliza de nuevo el *Express VI* denominado *to within Tolerance* para la programación de este estado.

#### ***twait***

En este estado se espera con la placa enfriadora puesta a la temperatura mínima del ciclo el tiempo que el usuario haya estimado mediante la modificación de la variable *twait* en minutos. Para la programación del estado, se utiliza el *Express VI* denominado *Time elapsed*.

Una vez transcurrido este tiempo se producen los siguientes acontecimientos:

1. La variable *Rise\_ramp*, que está conectada a un *case structure*, pasa a tener valor verdadero y se procede a establecer *Tmax* como temperatura consigna. Este *case structure* se ejecuta de forma paralela a la máquina de estados anterior.
2. Entonces, de forma paralela se pasa al siguiente estado *Tth/Tmax reached*
3. Acto seguido se activa un bucle *while* que tiene la función de modificar el coeficiente *HEAT MULTIPLIER* del controlador de la placa enfriadora cada minuto. Los valores en cada momento de este coeficiente dependen de la pendiente de subida deseada de entre las 3 posibles, tal y como se explicó en apartados anteriores.

Para implementar la rampa de subida es necesario detallar los parámetros que entran en juego:

- $p_{0+}$ : coeficiente de calentamiento inicial en tanto por uno.
- $i_+$ : incremento en el coeficiente de calentamiento en tanto por uno.

Teniendo en cuenta estos parámetros, la ecuación que sigue el coeficiente *HEAT MULTIPLIER* para implementar la rampa de subida de temperatura deseada es la siguiente:

$$HEAT MULTIPLIER(t) = p_{0+} + i_+ \cdot t$$

Donde *t* se mide en minutos, es cero al comienzo del bucle y se incrementa en una unidad cada minuto.

El valor de  $p_{0+}$  se calcula teniendo en cuenta los valores de *Tmin*. Los experimentos previos a la optimización del coeficiente  $p_{0+}$  se realizaron con una *Tmin* con valor de 20 °C y un valor *Tmax* de 100 °C.

Los coeficientes que se utilizaron para los distintos tipos de rampa de subida y la pendiente medida se resumen en la siguiente tabla:

Tipo de rampa de subida	$p_{0+}$	$i_+$	Pendiente (°C/min)
1	0.05	0.05	4
2	0.05	0.03	2.7
3	0.05	0.01	1.15

Tabla 4.1 Coeficientes utilizados para las distintas rampas de subida de temperatura con *Tmin*=20 °C y *Tmax*= 100 °C.

Teniendo en cuenta estos resultados el valor de  $p_{0+}$  para cualquier configuración de temperatura se calcula de la siguiente manera:

$$p_{0+} = \left( \frac{Tmin - 20 \text{ °C}}{Pendiente} \right) \cdot i_+ + 0.05$$

Cuando el valor de *Tmin* es menor de 20 °C, el coeficiente inicial  $p_{0+}$  comienza a ser menor que  $i_+$ .

La duración de la rampa de subida se estima restando el valor máximo de temperatura al valor mínimo y dividiendo por la pendiente:

$$Duración\ rampa\ (min) = \frac{Tmax\ (°C) - Tmin(°C)}{Pendiente\ \left( \frac{°C}{min} \right)}$$

#### **Tth/Tmax reached**

Se encarga de comparar la temperatura actual de la placa enfriadora con la temperatura umbral (*Tth*) y la temperatura máxima (*Tmax*).

Cuando se alcanza la temperatura umbral (de nuevo con una tolerancia de  $\pm 0.5$  °C) comienza el ciclado de luz mediante el envío de la orden de encendido a la lámpara. Este ciclado de luz se implementa en otra máquina de estados paralela que se encarga de realizar las mismas tareas que en el ciclo 1 (cambiar de una posición a otra así como almacenar datos de  $I_{sc}$  y  $V_{oc}$ , etc.). Sin embargo, en este caso el ciclado de luz se encuentra constantemente en ejecución hasta que la temperatura de la placa enfriadora vuelve a alcanzar la temperatura umbral definida por el usuario ( $T_{th}$ ), como se verá más adelante.

Al alcanzarse la temperatura máxima, se detiene el bucle encargado de realizar la rampa de temperatura y se pasa al siguiente estado *tmax*.

### **tmax**

En este estado se espera con la placa enfriadora puesta a la temperatura máxima del ciclo el tiempo que el usuario haya estimado mediante la modificación de la variable *tmax* en minutos. Para la programación del estado, se utiliza de nuevo el *Express VI* denominado *Time elapsed*.

Al igual que en *twait*, cuando este tiempo se cumple se producen una serie de acontecimientos:

1. La variable *fall\_ramp* pasa a tener valor verdadero, con lo que se activa la rampa de bajada de temperatura. Su implementación difiere un poco de la rampa de subida, ya que la temperatura consigna sigue siendo *Tmax* (para evitar que la placa enfríe demasiado rápido).
2. De forma paralela se pasa al siguiente estado *Tth/Tmin reached*
3. El *HEAT MULTIPLIER* va decreciendo cada minuto de forma que puede ser negativo, lo que significa que en lugar de calentar, enfría la placa. La ecuación de cálculo de este coeficiente en cada momento es:

$$HEAT\ MULTIPLIER(t) = p_{0-} - i_{-} \cdot t$$

donde  $p_{0-}$  e  $i_{-}$  se corresponden con el coeficiente de calentamiento inicial y el incremento, respectivamente.

Los coeficientes utilizados en los experimentos, con  $T_{min} = 20$  °C y  $T_{max} = 100$  °C, para cada tipo de pendiente de bajada y sus respectivas pendientes son:

Tipo de rampa de bajada	$p_{0-}$	$i_{-}$	Pendiente (°C/min)
1	-0.05	0.03	-5.4
2	0.6	0.05	-4
3	0.6	0.03	-2.7
4	0.6	0.01	-1

*Tabla 4.2 Coeficientes utilizados para las distintas rampas de bajada de temperatura*

El valor de  $p_{0-}$  para cualquier configuración de temperaturas se calcula mediante la siguiente fórmula para el tipo 1:

$$p_{0-} = \left( \frac{T_{max} - 100\text{ °C}}{Pendiente} \right) \cdot i_{-} - 0.05$$

Para los demás tipos es:

$$p_{0-} = \left( \frac{T_{max} - 100\text{ °C}}{Pendiente} \right) \cdot i_{-} + 0.6$$

La duración aproximada de la rampa de bajada se calcula de la misma manera que para la rampa de subida.



#### **Tth/Tmin reached**

Se encarga de comparar la temperatura actual de la placa enfriadora con la temperatura umbral (*Tth*) y la temperatura mínima (*Tmin*).

Cuando se alcanza el rango de temperaturas definido por *Tth* y la tolerancia de  $\pm 0.5$  °C, se procede a apagar la lámpara y finaliza el ciclado de luz.

Al alcanzarse la temperatura mínima se detiene el bucle generador de la rampa de bajada y se pasa al estado **Stop** de la máquina de estados que hace que quede detenida para que la máquina de estados general realice una nueva medida de la curva IV en oscuridad.

---

#### 4.5.4 STOP

Si después de realizar una medida de la curva IV en oscuridad de una o de ambas células el contador de medidas coincide con el número de medidas totales a realizar, se pasa al estado *Stop* y el evento *Start Selected Cycle* se da como concluido. El programa se mantiene en ejecución a la espera de nuevas órdenes por parte del usuario.



# CAPÍTULO 5 : PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

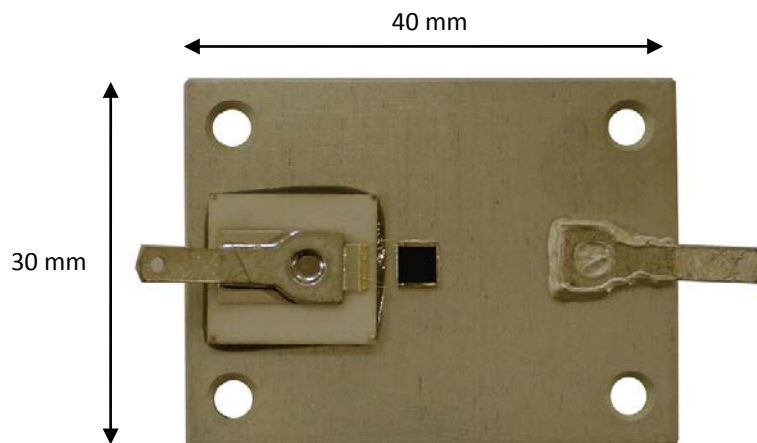


## 5.1.INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a analizar la evolución de la degradación de dos células solares de triple unión diseñadas y fabricadas por *AZURSPACE*. Sus características principales son las siguientes:

- Tipo de célula: 3C42 - 3x3 mm<sup>2</sup>
- Aplicación: módulos fotovoltaicos de concentración (CPV)
- Datos eléctricos típicos a 1000 soles:
  - $I_{SC} = 1.42 \text{ A}$
  - $V_{OC} = 3.09 \text{ V}$
  - Punto de máxima potencia:
    - $I_m = 1.39 \text{ A}$
    - $V_m = 2.75 \text{ V}$
    - $P_m = 3.82 \text{ W}$
  - Factor de forma (FF) = 87.1 %
  - Eficiencia de conversión energética ( $\eta$ ) = 41.7 %

El encapsulamiento de las células que se van a ciclar en la máquina LYSS es producido por la empresa *AUREL MICROELECTRONICS*, quedando un receptor soldado con epoxi de plata sobre un sustrato de aluminio.



*Figura 5.1 Receptor de las células a degradar por la máquina LYSS*

## 5.2 MONTAJE DE LAS CÉLULAS Y CONSIDERACIONES PREVIAS

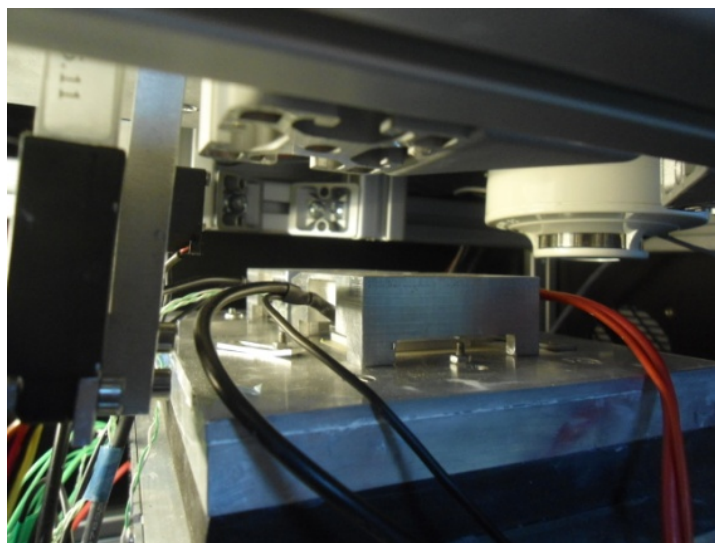


Figura 5.2 Montaje de las células junto al secundario diseñado en la placa enfriadora

### **Posición de las células**

Para la realización de las pruebas de estrés se procede a fijar las células (es decir, el receptor completo) en la placa de aluminio acoplada a la placa de fábrica en su posición óptima. Para ello se hace uso del menú *Monitoring and Cell Position Adjustment* que proporciona el software programado.

La tarea consiste en encontrar la posición óptima de éstas en la placa con el objetivo de que cada una de ellas proporcione el mayor valor posible de corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) a una potencia de lámpara determinada. El método consiste en probar varias posiciones de ambas células, ya sean las asociadas en el actuador lineal o las de la propia célula en la placa, hasta encontrar la óptima. Este procedimiento se realiza con una potencia de salida lámpara baja y con gafas de protección para que el operario no corra peligro alguno.

Una vez encontradas estas posiciones óptimas, las células se fijan en la placa utilizando el material adhesivo *CHO-TERM T-411*, que es muy buen conductor térmico y , además, aislante eléctrico.

A continuación, se acopla a cada una el elemento óptico secundario (SOE) diseñado en el capítulo 3 para lograr una concentración de aproximadamente 1000 soles en ambas células. De nuevo, puede ser necesario un ajuste en las posiciones del secundario hasta encontrar la posición óptima.

Tras este procedimiento se obtiene que para una potencia de salida de la fuente de la lámpara de 772 W ( $I_{prog} = 5.5$  V) ambas células generan una corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) de aproximadamente 1.35 A y una tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 2.96 V a una temperatura de base de célula de 60 °C. Estos valores de  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  se encuentran bastante próximos a los valores del punto de máxima potencia de la célula en cuestión a una concentración de 1000 soles.

### **Número de ciclos de luz requeridos**

El estrés térmico-mecánico que más afecta a los componentes del receptor y sus capas en operación real lo causa el paso repentino de nubes, que puede reducir la irradiancia nominal en éste de 500 soles o 1000 soles a cero en pocos segundos.

Se ha investigado el número de estas transiciones de luz a sombra en un sistema CPV producidas en Madrid en los tres últimos años con series de datos diarios DNI (*Direct Normal Insolation* o insolación directa normal) con base de tiempo en minutos.

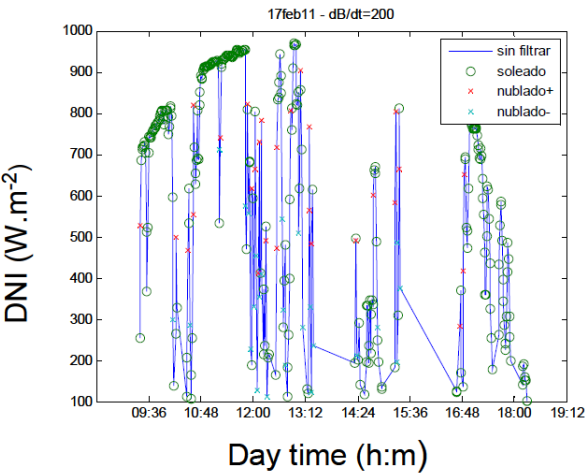


Figura 5.3 Gráfica que representa la insolación directa normal de un día nublado en Madrid en un sistema CPV

De la figura anterior se obtiene que en el día nublado de ejemplo se obtienen 23 caídas de valor de irradiancia.

Para los años 2011, 2012 y 2013 se han contado, respectivamente, 1256, 1273 y 1961 caídas de valor de irradiancia producidas por nubes. La media de estos tres años es de 1497 caídas de irradiancia por año. Como puede observarse en la siguiente tabla:

Año	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Total
2011	239	649	273	96	1257
2012	243	597	227	206	1273
2013	585	866	240	270	1961
Media	355	704	246	190	1497

Tabla 5.1 Número de caídas de irradiancia en Madrid causadas por nubes

En 30 años el sistema habrá pasado por unas 48000 caídas de irradiancia como la anterior. Este número será tenido en cuenta a la hora realizar los ciclos de luz por la máquina LYSS.

### Duración de los ciclos de luz

La intención de estas pruebas de estrés es la de realizar el mayor número de intervalos luz-sombra en un tiempo determinado. Para que el estrés que se pueda producir tenga efecto en la célula es necesario que la tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ) llegue a estabilizarse en cada ciclo de luz. Por ello se realiza un experimento para conocer este tiempo de estabilización y poder elegir el menor periodo posible para los ciclos de luz.

El experimento se trata de, una vez ajustadas las posiciones de las células, configurar el actuador en la posición de una de ellas con la lámpara apagada y a una temperatura de base de 60 °C. Acto seguido se enciende la lámpara con  $I_{prog} = 5.5\text{ V}$  (772 W) y se mide la evolución de la  $V_{OC}$  en la célula.

El resultado es el siguiente:

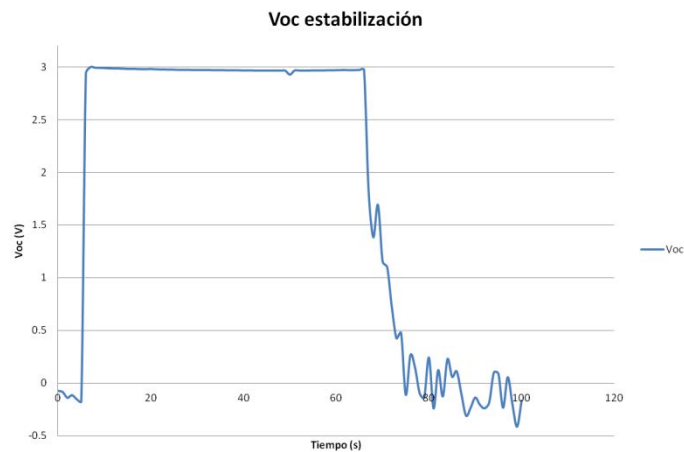


Figura 5.4 Gráfica de estabilización de la  $V_{OC}$

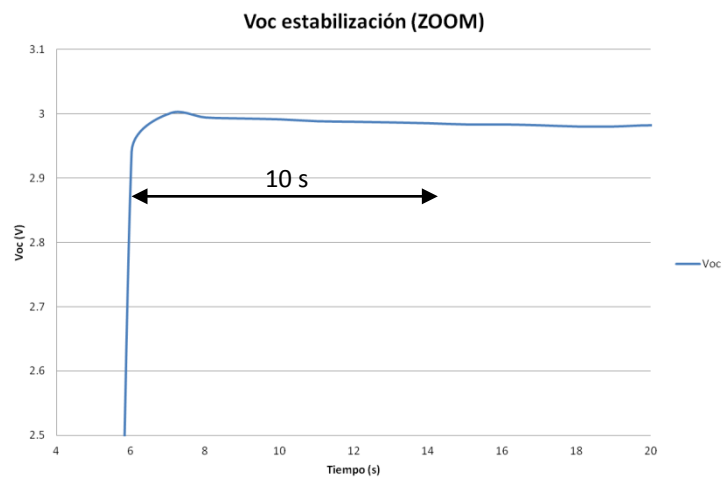


Figura 5.5 Gráfica de estabilización de la  $V_{OC}$  aumentada

De la figura anterior se puede concluir que la tensión de circuito abierto de las células a testear se estabiliza aproximadamente a los 10 segundos de estar iluminada. El decrecimiento de que se produce se debe a un aumento de temperatura de la célula lento que sigue a un calentamiento ultra rápido de ésta.

Este tiempo depende de la capacidad calorífica y la resistencia térmica de los elementos del receptor. Se han obtenido datos de la temperatura de la célula medida durante un ciclo de luz usando la  $V_{OC}$  como sensor de temperatura, ya que su valor depende de ella.

Como se ha comentado antes, la muestra consiste en la célula de triple unión detallada pegada con epoxi de plata sobre un sustrato de aluminio de  $3 \times 4 \times 0.3 \text{ cm}^3$ . Esta muestra está térmicamente unida a un gran disipador de calor (la placa enfriadora) a una temperatura fija.



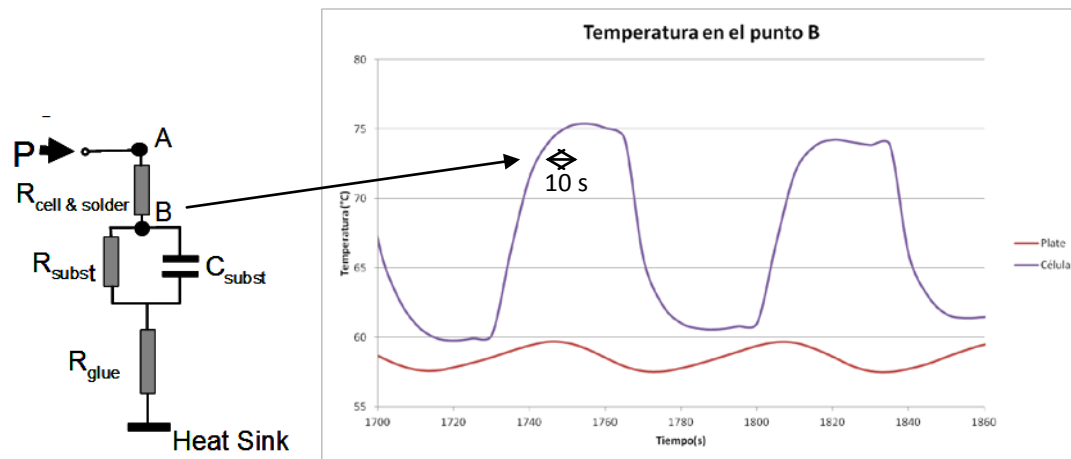


Figura 5.6 Izquierda: circuito térmico equivalente. Derecha: evolución de la temperatura durante el ciclado de luz en la parte superior del sustrato

Se observa que el estado de equilibrio de la temperatura en la parte superior del sustrato se alcanza de nuevo a los 10 segundos aproximadamente. Además, se puede ver que la temperatura crece muy rápido (en pocos milisegundos) con respecto al sustrato debido a la caída en la resistencia  $R_{cell \& solder}$ . Después de esto el sustrato se calienta de manera mucho más lenta hasta alcanzar el estado de equilibrio a los 10 segundos.

En conclusión, los ciclos se deberán de configurar con un tiempo mínimo de iluminación ( $t_{on}$ , para la célula 1 y  $t_{off}$ , para la célula 2) de 10 segundos, ya que el receptor alcanza el estado de equilibrio en ese tiempo. En realidad, como ya se explicó, el ciclo luz-sombra para una célula determinada será de 30 segundos ya que hay que añadir el retardo que tiene el spot de luz en llegar de una célula a otra, que es de 5 segundos aproximadamente.

#### Colocación de los termopares

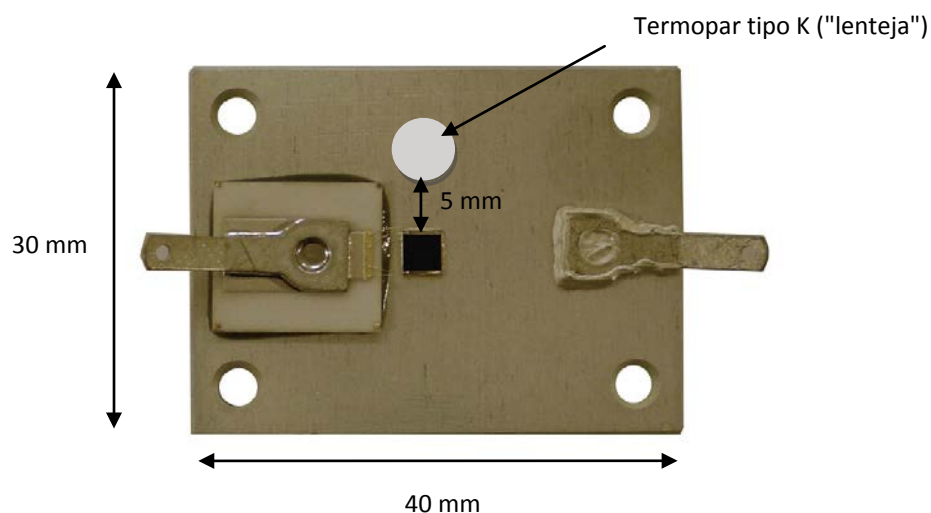
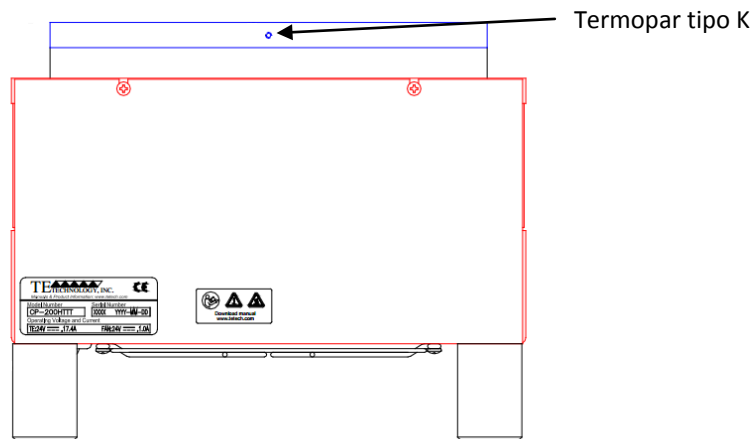


Figura 5.7 Representación de la colocación del termopar de medida en cada una las células a testear

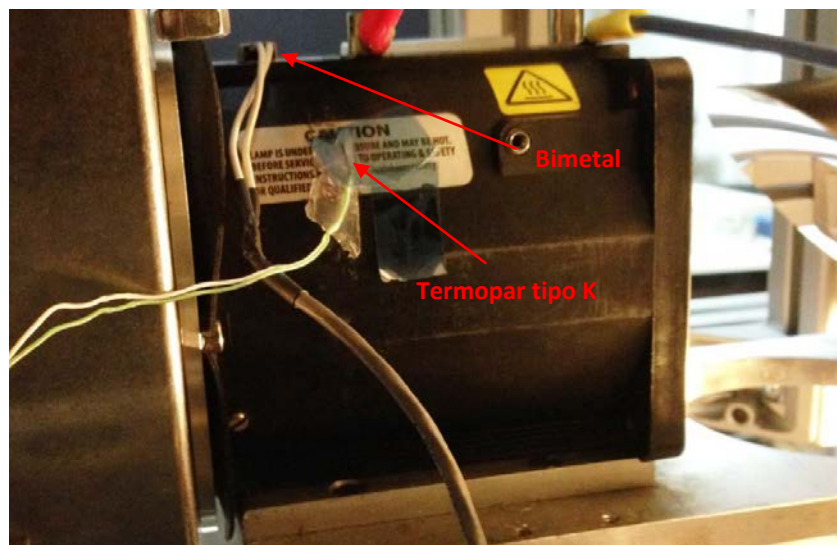
En la figura anterior se observa dónde se han colocado los termopares asociados a cada célula para monitorizar su temperatura. Estos dos termopares se tratan de colocar en la posición más cercana a la célula posible para que la temperatura sea lo más parecida a la que se tiene en la superficie de ésta.

Otro de los termopares se inserta en el agujero que tiene la placa enfriadora en su parte central diseñado a tales efectos.



*Figura 5.8 Esquema de colocación del termopar asociado a la placa enfriadora*

Por último, se coloca el cuarto termopar disponible en la carcasa de la lámpara para tener cierta idea de la temperatura de ésta. Este termopar está colocado en la parte de la carcasa de la lámpara no visible por el operario, como se muestra en la figura siguiente:



*Figura 5.9 Fotografía que muestra la disposición empleada del termopar asociado a la carcasa de la lámpara y del bimetálico de protección.*

### 5.3 TIPO DE CICLO LARGO REALIZADO

La configuración de ciclo largo de estrés termo-mecánico realizado a este receptor es la siguiente:

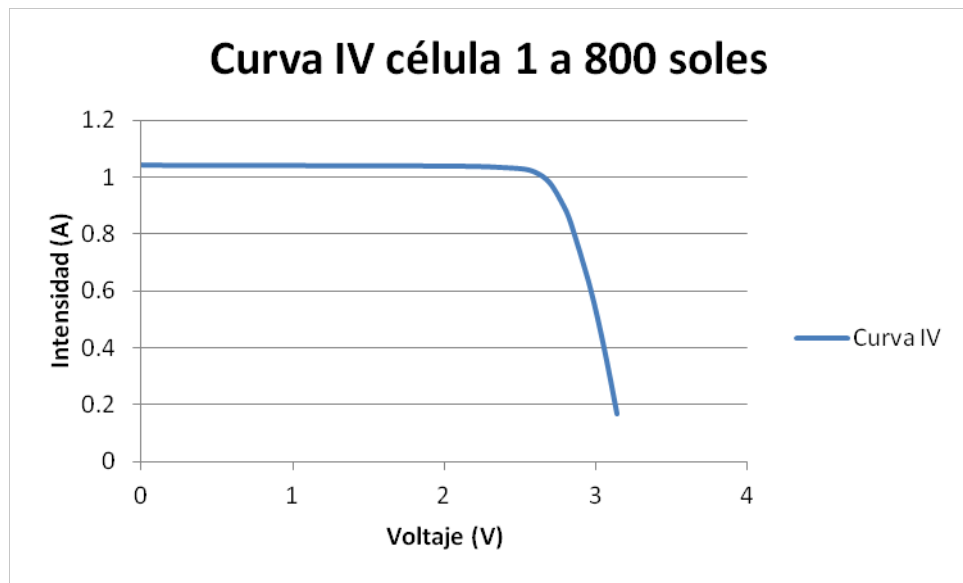
- Tipo de ciclo térmico-luminoso: Ciclo 1
  - $t_{on}=t_{off}= 10$  segundos
  - $I_{prog} = 5.5 \text{ V} = 772 \text{ W}$
  - $T_{measure} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
  - $T_{cycle} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
  - $N_{cycles}$  (ciclos de luz) = 240 ciclos de luz/ ciclo térmico-luminoso. Duración = 2 horas aproximadamente.
- Medida curva IV en oscuridad
  - $V_{max} = 4.2 \text{ V}$
  - $I_{max} = 1.5 \text{ A}$
  - $V_{threshold} = 3 \text{ V}$
  - $R_s \text{ Lower Limit} = 1 \text{ A}$
  - $R_s \text{ Upper Limit} = 1.2 \text{ A}$
  - $N_{samples \text{ DarkIV}} = 100$  muestras
- Límite horario
  - $Hour \text{ min} = 8$
  - $Hour \text{ max} = 20$

Se procede a realizar este tipo de ciclos 5 días por semana siguiendo el límite horario fijado, lo que conlleva la realización de 5 ciclos largos por día, o sea, 6000 ciclos de luz por cada célula a la semana. En 2 meses se debería de poder realizar 48000 ciclos de luz que simulan las caídas de irradiancia producidas por nubes anteriormente descritas.

### 5.4 ESTADO INICIAL DE LAS CÉLULAS

Las células escogidas para degradar presentan de inicio las siguientes curvas IV en iluminación para una concentración de 800 soles:

### Célula 1

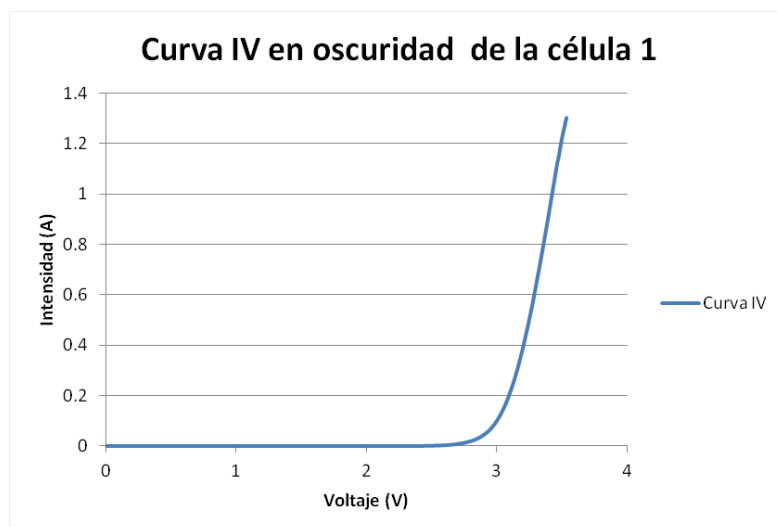


*Figura 5.10 Curva IV de la célula 1 en iluminación inicial para una concentración de 800X*

Los parámetros característicos resultantes de esta primera medida son:

- $V_{OC} = 3.2 \text{ V}$
- $I_{SC} = 1.05 \text{ A}$
- $P_m = 2.65 \text{ W}$
- $V_m = 2.6 \text{ V}$
- $I_m = 1.02 \text{ A}$
- $FF = 79 \%$
- Eficiencia de conversión energética ( $\eta$ ) = 36.7 %

La primera medida de curva IV en oscuridad a 25 °C realizada con la máquina LYSS se muestra a continuación:

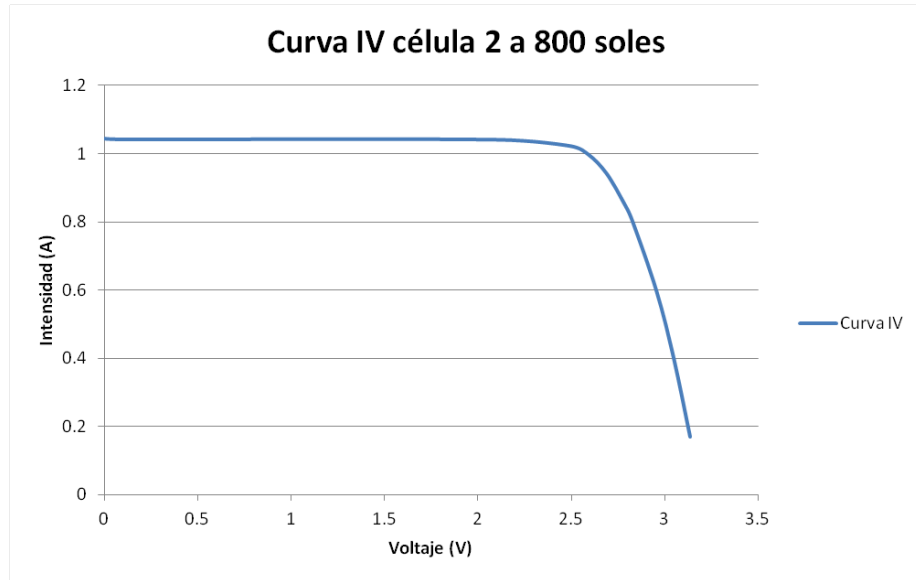


*Figura 5.11 Curva IV en oscuridad inicial de la célula 1*

La estimación de resistencia serie inicial para esta célula entre los límites  $[I_{min}, I_{max}] = [1 \text{ A}, 1.2 \text{ A}]$  tiene un valor de 0.34 ohm.

### **Célula 2**

Para la célula 2 se obtienen los siguientes resultados:



*Figura 5.12 Curva IV de la célula 2 en iluminación inicial para una concentración de 800X*

Sus parámetros característicos son:

- $V_{OC} = 3.2 \text{ V}$
- $I_{SC} = 1.05 \text{ A}$
- $P_m = 2.59 \text{ W}$
- $V_m = 2.6 \text{ V}$
- $I_m = 0.99 \text{ A}$
- $FF = 77.1 \%$
- Eficiencia de conversión energética ( $\eta$ ) = 35.9 %

Y su curva IV en oscuridad inicial es:

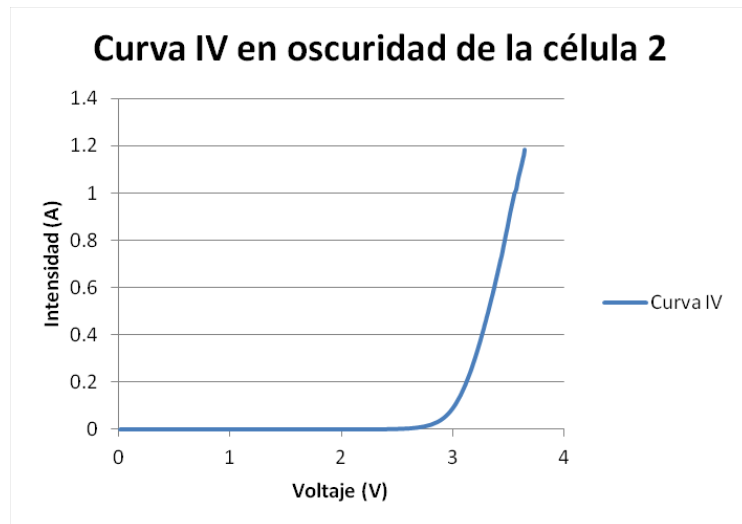


Figura 5.13 Curva IV en oscuridad inicial de la célula 2

En este caso, la estimación de la resistencia serie tiene un valor de 0.47 ohm

## 5.5 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA SERIE

Como ya se sabe, en cada medida de la curva IV en oscuridad se calcula una estimación de la resistencia serie de cada célula. Estos valores de resistencia serie se almacenan en el fichero que contiene los datos de las curvas IV en oscuridad, con lo que se puede representar la evolución de esta estimación para cada célula en función del número de ciclos cortos (ciclos de luz) realizados.

### Célula 1

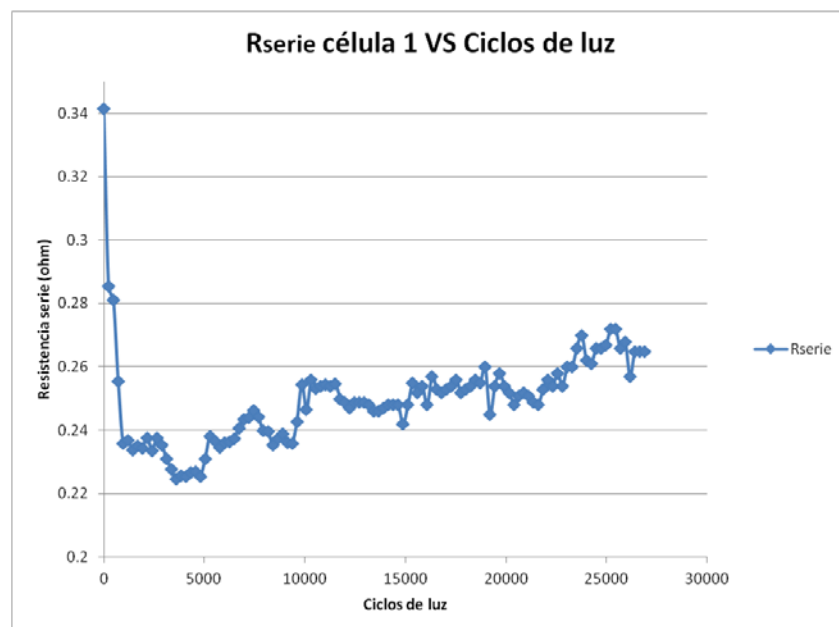


Figura 5.14 Evolución de la resistencia serie de la célula 1 en relación con el número de ciclos de luz realizados

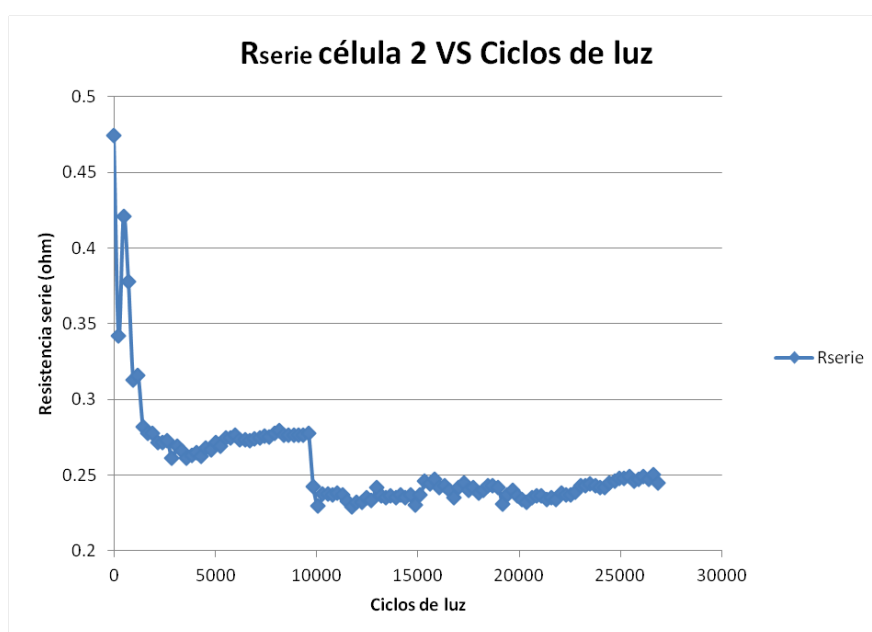
El primer punto de la gráfica anterior corresponde con la primera estimación de la resistencia serie de la célula antes de proceder a realizar los ciclos. Los demás puntos corresponden con medidas de curva IV

en oscuridad después de la realización de un ciclo termo-mecánico, es decir, se toma una medida cada 240 ciclos de luz, según se configuró.

Después de 26880 ciclos de luz se puede concluir que:

- La realización de los 4 primeros ciclos largos conlleva una mejora en la resistencia serie de la célula que decrece en aproximadamente 0.1 ohmios. Posiblemente se deba a un proceso de recocido de las soldaduras del receptor.
- A partir de ese punto la resistencia serie se estabiliza y comienza a incrementar su valor. Después de casi 27000 ciclos de luz la resistencia serie de la célula 1 incrementa en un 3% su valor (desde que comienza a ser estable). Por tanto, la evolución de la resistencia serie es insignificante por el momento.

### **Célula 2**



*Figura 5.15 Evolución de la resistencia serie de la célula 2 en relación con el número de ciclos de luz realizados*

Las conclusiones que se obtienen para la célula 2 son similares a las obtenidas con la célula 1 aunque hay que tener en cuenta que a los 10000 ciclos de luz realizados en ésta se la resistencia serie vuelve a mejorar con respecto a los primeros ciclos largos y se estabiliza de nuevo. A partir de esta estabilización, la resistencia serie se incrementa en apenas un 2%.

### **Conclusión final a las pruebas de estrés experimentales**

La degradación después de unos 27000 ciclos cortos es insignificante para ambas células con lo que es necesario seguir realizando este tipo de ciclo térmico-luminoso durante un tiempo indeterminado para poder observar un incremento significativo en la resistencia serie, y por tanto, un deterioro en la eficiencia de conversión de la célula, que se espera que se produzca a los 48000 ciclos de luz o antes.

Cuando la degradación comience a ser evidente (por ejemplo, un 10% de subida del valor de resistencia serie) se extraerán las células de la placa y se volverán a medir sus curvas IV en iluminación para poder observar la degradación real que han sufrido con respecto a la medida inicial.

Sería conveniente verificar a qué se debe la bajada inicial del valor de la resistencia serie de cada célula realizando un proceso de recocido en otro par de muestras. Durante los ciclos de luz, la temperatura que capta el termopar situado al lado de la célula es de unos 15 °C por encima de la temperatura de la base, es decir, de unos 75 °C. Teniendo en cuenta que la célula en sí está a una temperatura de unos 85 °C aproximadamente (es decir, 10 °C más que justo al lado), el proceso de recocido consistiría en colocar las muestras en una caja térmica con aire a 90 °C de manera continua observando si se produce mejora en la resistencia serie y así poder sacar conclusiones válidas sobre la bajada en el valor de resistencia serie en los primeros ciclos largos.



# CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO



## 6.1 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1.1 CONCLUSIONES

Con este proyecto se ha diseñado e implementado de forma satisfactoria un equipo para realizar pruebas de estrés termo-mecánico a células solares de concentración así como el software compatible para controlarlo y administrar los resultados obtenidos. Este equipo ha sido nombrado como máquina LYSS (*Light cYcling Stress Source*) con el fin de que ésta sea comercializada internacionalmente.

Además, se han revisado conceptos básicos de células solares, tales como su curva característica IV en iluminación y en oscuridad, así como los parámetros que se obtienen de éstas. También se han definido las características de las pruebas que se desean llevar a cabo con la máquina y se ha establecido un criterio de fallo.

Una vez decididas las características de la máquina y las de los diferentes dispositivos que la componen, se ha procedido a realizar un estudio exhaustivo de las distintas posibilidades que el ofrece el mercado, escogiendo los modelos que se han considerado totalmente compatibles para realizar las funciones requeridas, no sin antes justificar de forma teórica y/o experimental la elección del modelo en cuestión cuando se ha considerado necesario. De esta misma manera, cuando se ha requerido la justificación de la inclusión de algún elemento no comercial, tales como el SOE asociado a los receptores de prueba, o de alguna decisión referente a la forma, tamaño y/o disposición de éstos dentro de la máquina, se ha procedido a realizar simulaciones por ordenador con este propósito.

Asimismo, se ha explicado de forma teórico-práctica el funcionamiento de cada uno de estos dispositivos procediendo a la realización de experimentos reales para observar los parámetros más importantes de cada uno. De esta manera, se han introducido conceptos de cálculo de perfiles de potencia luminosa, tales como el perfil de energía acumulada y el perfil por coronas, así como conceptos de transferencia de calor.

En cuanto al desarrollo del software, se ha explicado mediante diagramas de flujo la funcionalidad de la aplicación programada mediante el entorno *LabVIEW*, mostrando las características, en la medida de lo posible, que tiene cada parte de dicha aplicación. Además, se han introducido las principales funciones que se han utilizado y se han mostrado capturas de pantalla de la interfaz visual que utilizará el usuario final.

Por último, se han mostrado los resultados obtenidos de realizar un tipo de pruebas de estrés a temperatura de base de célula constante (Ciclo 1) a dos receptores solares reales argumentando empíricamente los parámetros utilizados. Se ha explicado con detalle el montaje realizado y mostrado capturas del mismo. Se han obtenido conclusiones sobre la evolución de la resistencia serie de ambos dispositivos.

Como resumen y conclusión final, el equipo para realizar pruebas de estrés termo-mecánico a células solares de concentración, denominado máquina LYSS, ha sido desarrollado y funciona correctamente. Este equipo está preparado para trabajar y analizar la fiabilidad de cualquier tipo de receptor de células solares, con y sin SOE.

### 6.1.2 TRABAJO FUTURO

El equipo es capaz de realizar dos tipos de pruebas de estrés termo-mecánico (Ciclo 1, a temperatura de base de célula constante y Ciclo 2, con un ciclado térmico en ésta). Cada una de ellas presenta un amplio abanico de posibilidades en cuanto a tipos de ciclos térmicos y de luz.

Al ser compatible con cualquier receptor de células solares, el trabajo futuro pasa por analizar la fiabilidad de varias tecnologías de células y/o receptores solares atendiendo a diferentes configuraciones de ciclos térmicos y de luz para así poder obtener conclusiones sobre la degradación real que produce en la eficiencia de la célula la ejecución continua de cada uno de ellos y poder dar lugar a numerosos estudios en ese campo.

## 6.2 PUBLICACIÓN REALIZADA EN EL MARCO DE ESTE PROYECTO

En el marco de este proyecto se ha elaborado una publicación para el congreso denominado *CPV-10 (10th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems)* que tuvo lugar desde el 7 al 14 de Abril de 2014 en Albuquerque (Nuevo México, Estados Unidos) y cuya referencia bibliográfica se muestra a continuación:

PÉREZ, V.; ANTÓN, I.; HERRERO, R.; NOGUEIRA, E.; NUÑEZ, R.; DEL CAÑIZO, C.; SALA, G. *Induced Thermo-Mechanical Stress IN CPV Receivers With Cycled High Intensity Light*. 2014. 10th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV-10)

# BIBLIOGRAFÍA



IEC 62108. *Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies—design qualification and type approval*. 1.0 ed., 2007.

LORENZO, Eduardo; ARAUJO, Gerardo L. *Electricidad solar: ingeniería de los sistemas fotovoltaicos*. 1994.

ANTÓN HERNÁNDEZ, Ignacio. *Métodos y equipos para la caracterización de sistemas fotovoltaicos de concentración*. 2004. Tesis Doctoral. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM.

DAVIDSON, Michael W. *Fundamentals of Xenon Arc Lamps*. Carl Zeiss Microscopy Online Campus

CENGEL, Yunus A.; KLEIN, Sanford A.; BECKMAN, William A. *Heat transfer: a practical approach*. 1998.

HERRERO, Rebeca. *Desarrollo de una aplicación para la captura e interpretación de imágenes de foco en sistemas de muy alta concentración fotovoltaica*. 2008. Proyecto fin de carrera. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM

*Manual práctico de Ventilación*. 2009. Salvador Escoda S.A.

*Light Tools, Core Module User's Guide Version 6.0*. 2007. Optical research associates

*Off-Axis Parabolic Mirrors (Introduction)*. Disponible en:

<http://www.lasertechn.com/index.php/component/content/article/22>

*Optical Scattering and Surface Roughness*. Disponible en: <http://eckop.com/optics/understanding-your-optical-engineer/optical-scattering-versus-surface-roughness/>

*THE HEATSINK GUIDE : Peltier Guide*. Disponible en: <http://www.heatsink-guide.com/peltier.htm>

*LabVIEW Fundamentals*. Disponible en: [www.ni.com/pdf/manuals](http://www.ni.com/pdf/manuals)

*LabVIEW Control Design Toolkit User Manual*. Disponible en: [www.ni.com/pdf/manuals](http://www.ni.com/pdf/manuals)

*Manuales módulos NI 9211, NI 9215, NI 9263, NI 9375*. Disponible en : [www.ni.com/pdf/manuals](http://www.ni.com/pdf/manuals)

*Linear actuator controller advanced configuration*. Disponible en:

[http://www.firgelli.com/pdf/LAC\\_Advanced\\_Configuration.pdf](http://www.firgelli.com/pdf/LAC_Advanced_Configuration.pdf)

*Instruction Manual for Model TC-36-2- RS232 Thermoelectric Cooler Temperature Controller*. Disponible en: <http://www.tetech.com/docs/tc3625rs232manual.pdf>

*USER MANUAL XLB-1000/1500 Short Arc Xenon Lamp Ballast*. Disponible en:

[http://www.luminapower.com/manuals/xlb\\_1000\\_1500\\_manual.pdf](http://www.luminapower.com/manuals/xlb_1000_1500_manual.pdf)



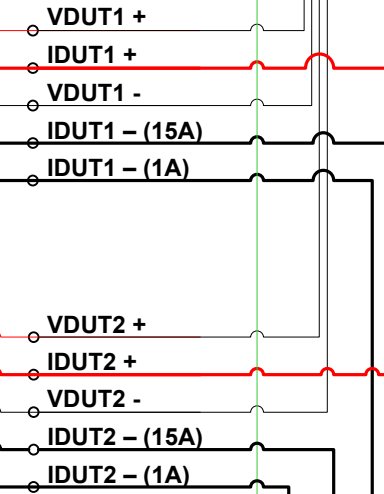


# ANEXO 1 : ESQUEMA GENERAL DE CONEXIONES



ESQUEMA DE CONEXIONES

COLD PLATE

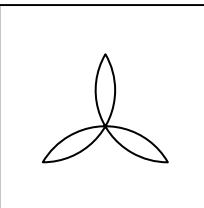


PT100  
2 Hilos  $\phi$  2,5  
2 Hilos  $\phi$  5,0

ESPEJO

ACTUADOR

VENTILADORES



230 AC

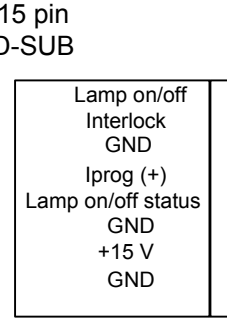
LÁMPARA XENON

LAMP +  
Ground

IGNITOR

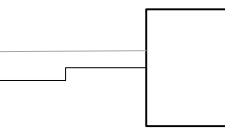
TR (2 hilos)  
PS+  
Ground

FUENTE LÁMPARA XENON



blanco  
blanco  
blanco  
230 AC

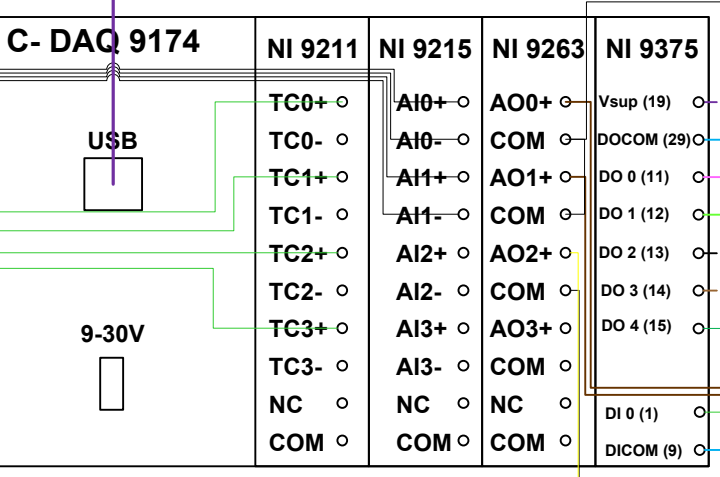
BIMETAL (75°C)



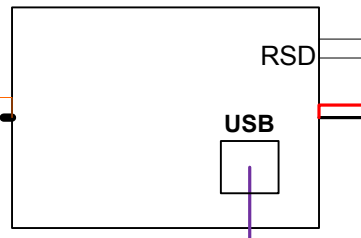
Smoke Detector



Panel de control manual

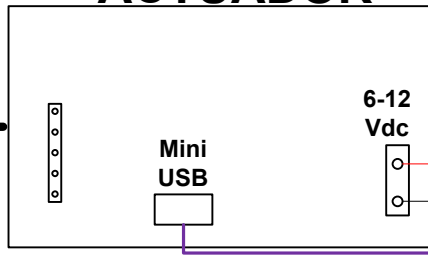


CONTROLADOR PLATE



FUENTE PLATE

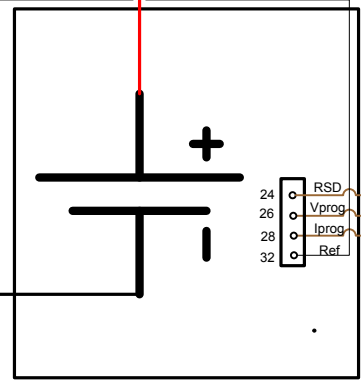
CONTROLADOR ACTUADOR



FUENTE 5VDC

Bornero 230 AC

PS - dark IV

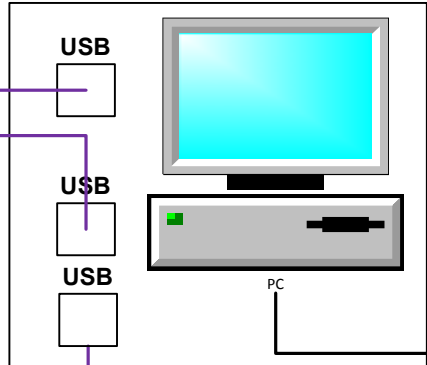


CAJA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Panel de control manual

Remote shutter (TBS1-TBS2)  
TBS15-TBS16  
LAMP ON  
TBS13  
TBS14

PC



230 AC



# ANEXO 2 : PANEL DE CONTROL MANUAL



## A2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

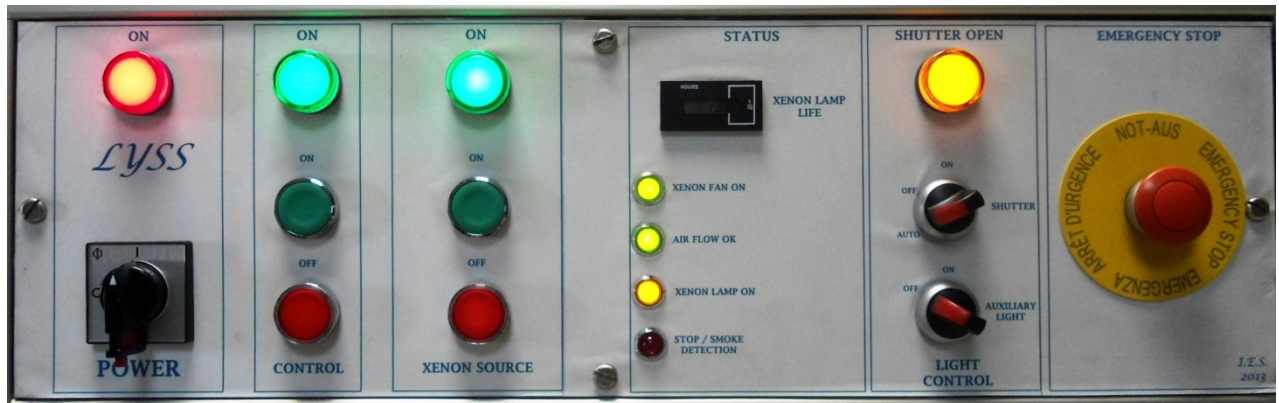


Figura A.1 Panel de control manual

La función del panel de control es la de controlar y/o monitorizar las siguientes señales de la máquina LYSS, que se pueden observar en la figura anterior divididas en 6 casillas:

- **POWER:** Encendido y apagado del equipo mediante el conmutador de selección *POWER*. Si el LED rojo situado encima de éste se encuentra iluminado significa que la máquina tiene alimentación.
- **CONTROL :** Encendido y apagado de la caja de control y adquisición de datos. Utilizando los botones *ON* y *OFF* de esta parte se controla la alimentación a la caja de control y adquisición de datos. El LED de la parte superior indica el estado en que se encuentra.
- **XENON SOURCE :** Encendido y apagado de la fuente de alimentación de la lámpara de arco de xenón. Para encender la fuente es necesario pulsar el botón de encendido (*ON*) hasta que el indicador *AIR FLOW OK* de la casilla *STATUS* se ilumine, tal y como se explicará a continuación. Si se desea apagar la fuente se debe de pulsar el botón de apagado (*OFF*). Después de que transcurra un tiempo determinado por un temporizador (ver esquema de conexiones) se apagará además el ventilador acoplado a la carcasa de la lámpara, que se habrá mantenido encendido hasta entonces por cuestiones de refrigeración de dicha lámpara.
- **STATUS**
  - *XENON LAMP LIFE* : cuenta el tiempo (en horas) que la lámpara lleva encendida.
  - *XENON FAN ON* : indica el estado del ventilador centrífugo acoplado a la carcasa de la lámpara de arco de xenón.
  - *AIR FLOW OK* : indica si el flujo de aire del ventilador centrífugo acoplado a la carcasa de la lámpara de arco de xenón es correcto. De lo contrario no permite que se encienda la fuente de alimentación de la lámpara.
  - *XENON LAMP ON* : indica el estado de la lámpara de arco de xenón.
  - *STOP/SMOKE DETECTOR* : si el detector de humo activa la señal de alarma, se deja sin alimentación a la fuente de la lámpara y a la caja de control y adquisición de datos.
- **SHUTTER OPEN :** casilla para uso futuro de un obturador (*shutter*) cuya función será la de cerrarse cuando la puerta de la máquina se abra para no dejar pasar el haz de luz hacia las células ni hacia el operario como medida de seguridad. En esta casilla también se encuentra el conmutador *AUXILIARY LIGHT* que sirve para encender una luz auxiliar que permita mejorar la

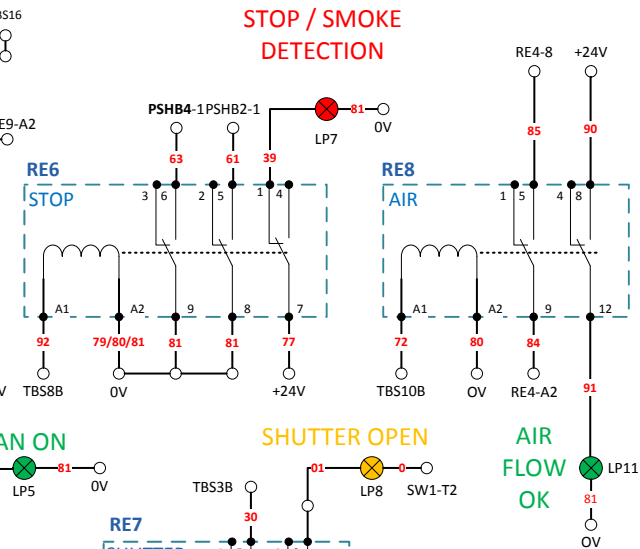
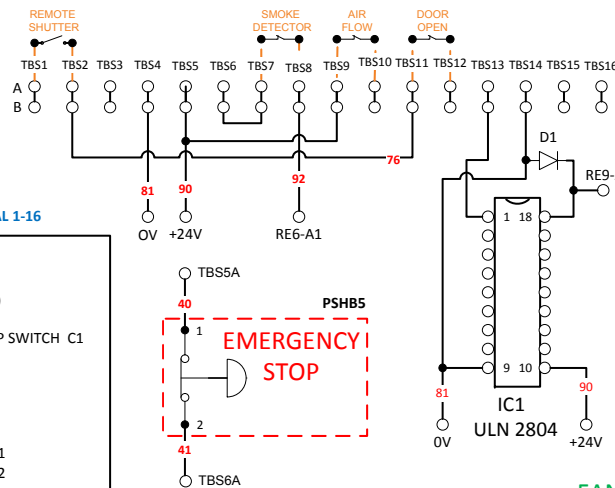
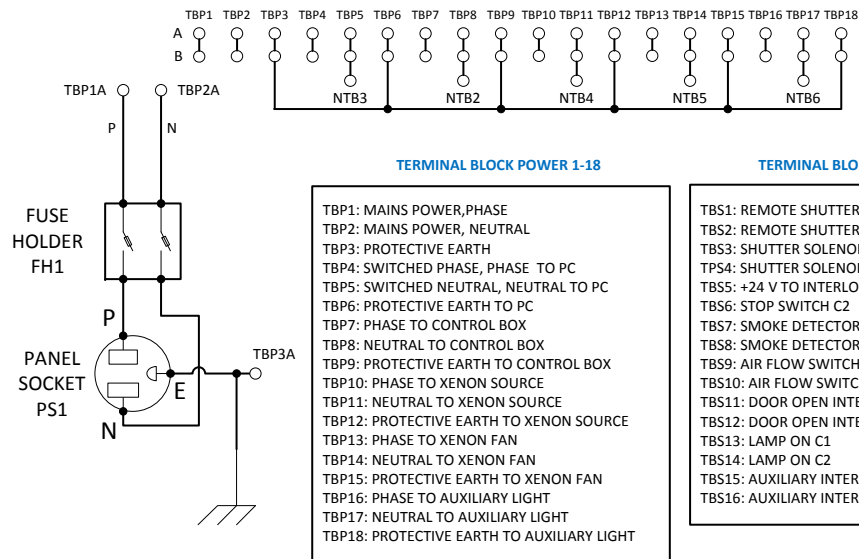
visualización de los componentes que se encuentran dentro de la máquina cuando se necesite manipular cualquiera de ellos.

- *EMERGENCY STOP* : botón de parada de emergencia. Si se pulsa, desconecta la caja de control y adquisición de datos así como la fuente de la lámpara de arco de xenón.

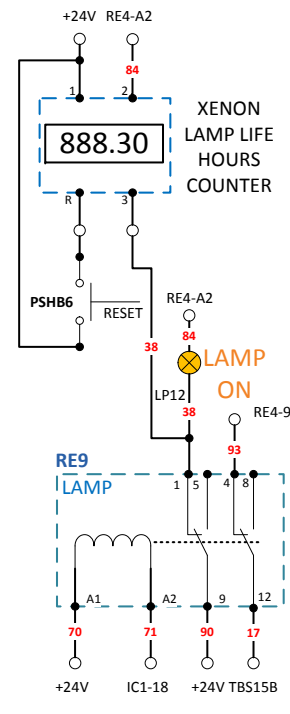
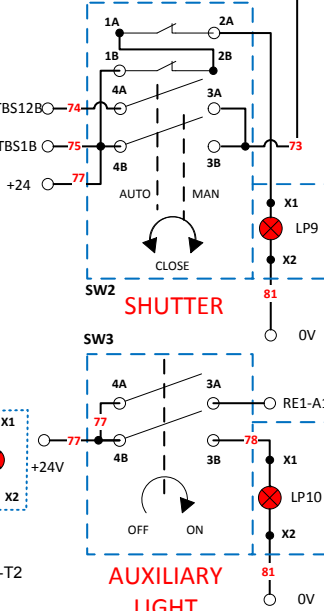
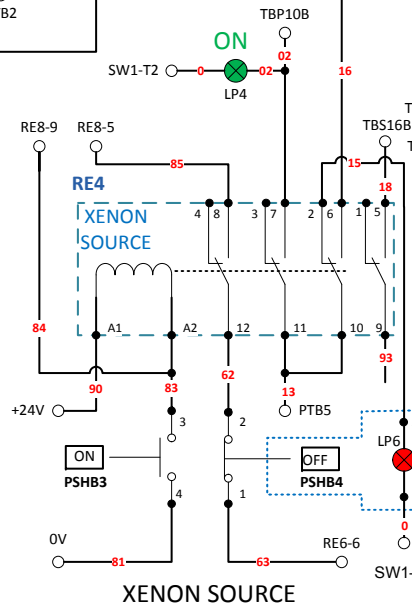
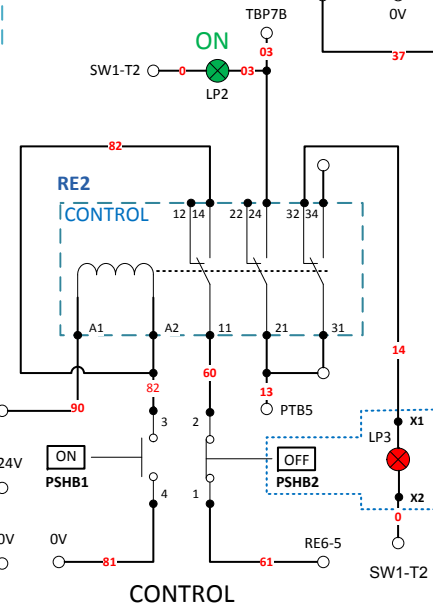
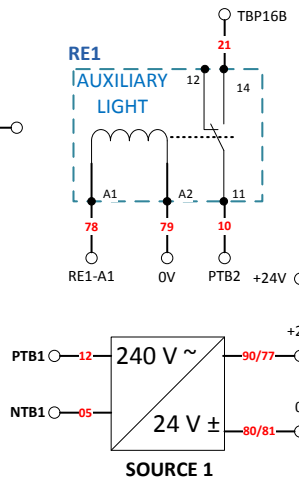
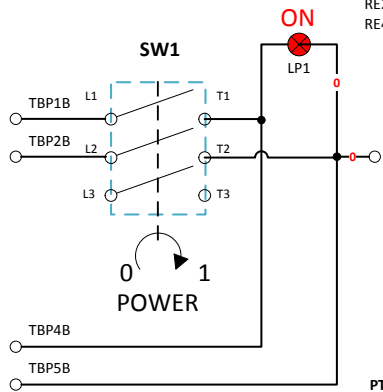
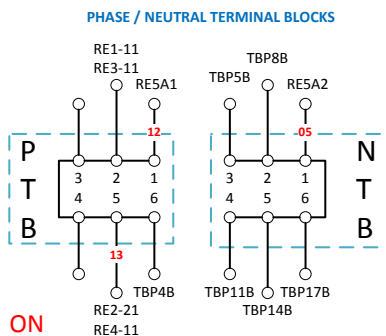
## A2.2 ESQUEMA DE CONEXIONES DEL PANEL DE CONTROL MANUAL

A continuación se muestra el esquema de conexiones del panel de control manual:





# ESQUEMA DE CONEXIONES DEL PANEL DE CONTROL MANUAL





# PLIEGO DE CONDICIONES



A continuación se presentan las especificaciones que cumplen los dispositivos de mayor importancia dentro de la máquina LYSS. Estos son:

- Lámpara de arco corto de xenón con reflector parabólico modelo *CL1000DF*
- Placa enfriadora modelo *CP-200HT-TT* y controlador bidireccional modelo *TC-36-25-RS232*
- Módulos de *National Instruments*
  - *NI 9211*
  - *NI 9215*
  - *NI 9263*
  - *NI 9375*
- Actuador lineal modelo *L12-50-100-06-P* y controlador modelo *LAC - Firgelli Linear Actuator Control Board*
- Fuente de alimentación programable para las curvas IV en oscuridad modelo *S 6-40*





**Christmas  
Shutdown  
Dec 23 - Jan 2  
Click for Details**

**NEW!**



**Replacement lamp  
for Olympus CLV190  
NOW AT  
\$500 EACH!**

Welcome visitor you can [login](#) or [create an account](#).

Shop Search

## OVERVIEW

## Parabolic/Collimated Lamps - D Body

[View Cart](#)

## PRODUCT CROSS REFERENCE

## PRODUCTS

## DISTRIBUTION

## SERVICE & CARE

## TECHNICAL ASSISTANCE



**CeraLux™ Xenon Collimated  
with Parabolic Reflector**

### D Body Size

Luxtel's D size Parabolic CeraLux Xenon Lamps have an integrated reflector which provides an intense and brilliant beam of collimated light. These high output lamps are perfect for solar simulation, large venue projection or applications requiring large amounts of pure white light.

As with all CeraLux lamps, the xenon gas provides the best white light for the most accurate color spectrum without the use of mercury or other rare earth elements that can be difficult to dispose of.

Luxtel offers D body size lamps in common power ranges or we can assist you in any number of OEM or custom designs. All lamps are designed to exact manufacturing requirements and will fit your current system or can be designed for your specific needs. Lamps with enhanced UV output are also available.

### Did You Know?

**Fixed Focused**  
Describes devices that are not provided with a means of focusing.

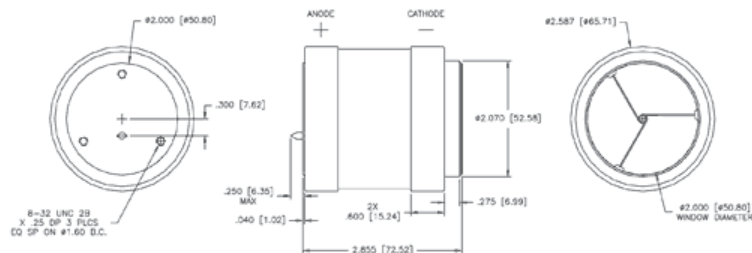
### Quick Links

[Technical Assistance  
and Installation](#)

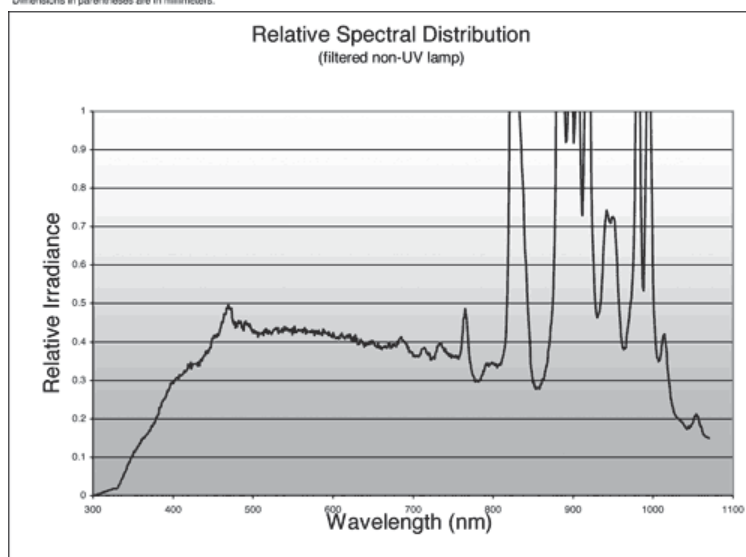
[Service & Care](#)

[Order Now](#)

### Mechanical Specifications



Dimensions in parentheses are in millimeters.



OPERATIONAL SPECIFICATIONS		CL500DF	CL500DUV	CL700DF	CL700DUV	CL1000DF	CL1000DUV
POWER (watts)	Nominal	500	500	700	700	1000	1000
	Range	350-575	350-575	550-800	550-800	850-1050	850-1050
CURRENT (amps DC)	Nominal	27	27	37	37	51	51
	Range	20-32	20-32	32-40	45-65	46-54	46-54
VOLTAGE (volts DC)	Nominal	18.5	18.5	19	19	19.5	19.5
	Range	16-21	16-21	17-22	17-22	18-22	18-22
Minimum Ignition Voltage (kV)		32	32	32	32	32	32
OUTPUT AT NOMINAL POWER							
Radiant Output (watts)		115	115	168	168	250	250
Visible Output (lumens)		10500	9600	15800	15800	24000	22000
UV Output (watts)		5	11	8	16	13	25
IR Output (watts)		64	61	92	88	135	132
Color Temperature (°K)		5900	5050	5900	5050	5900	5050
Arc Gap (inches/mm)		.090/2.29	.090/2.29	.090/2.29	.090/2.29	.090/2.29	.090/2.29

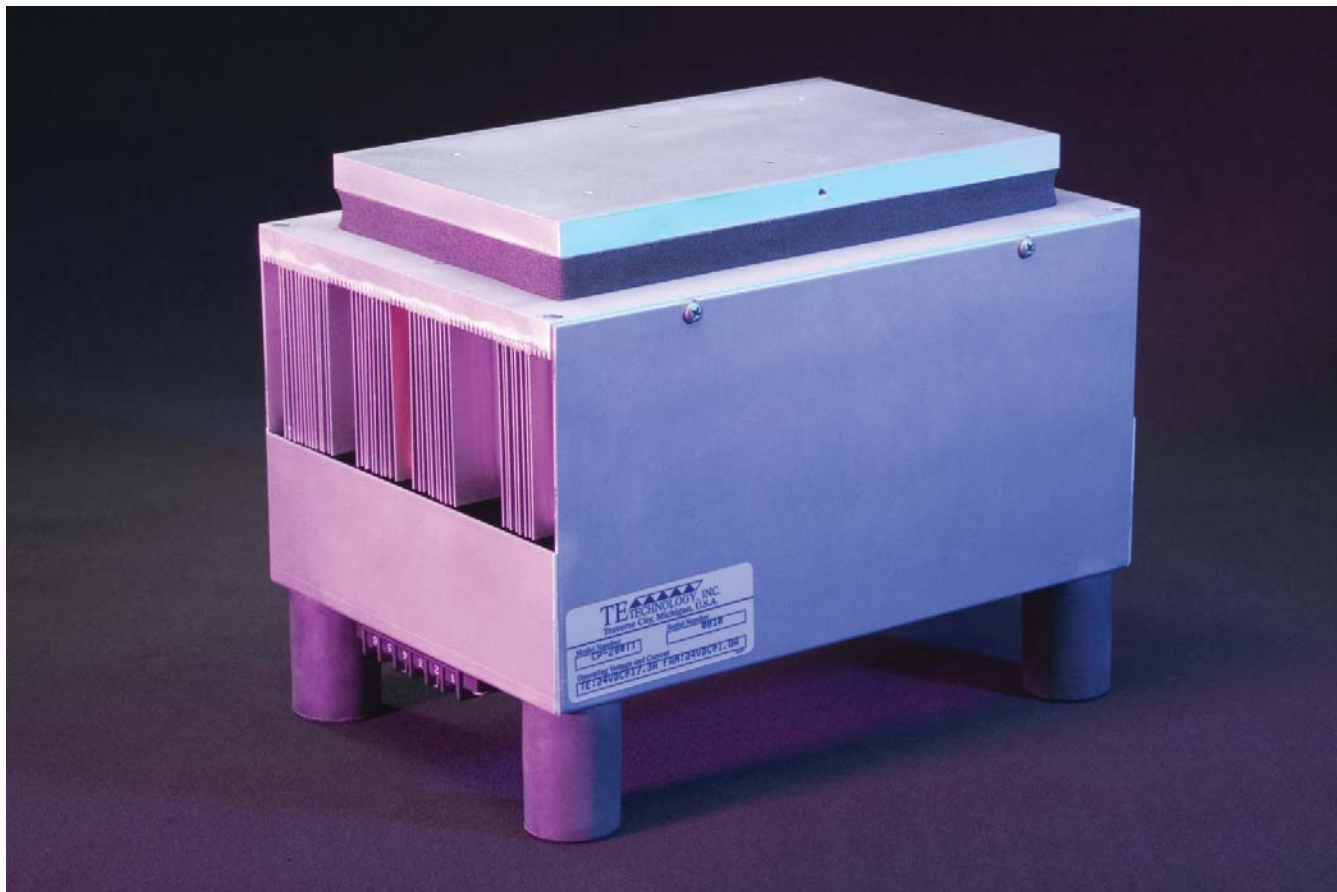


Online  
Payments

Luxtel LLC ® · 100 Ferncroft Road · Danvers, MA 01923  
Tel: (978) 774-9136 Have questions? E-mail: [info@Luxtel.com](mailto:info@Luxtel.com) · [Blog](#)



# CP-200HT-TT Peltier-Thermoelectric Cold Plate Cooler



- Same features as the CP-200HT but with legs added to allow for bench-top use.
- Stainless steel liquid heat exchanger (one or two LC-SSX1) can be attached for cooling corrosive liquids.
- Provides effective direct-contact cooling which is ideal for precision temperature control. Can also heat up to 100 °C.
- Efficient bonded-fin heat sink keeps cooler small but effective.
- Threaded holes are located in the cold plate for easy attachment of a temperature sensor, interface plates, and other cooled plates.
- High-temperature version and other customizations are available upon request.
- CE marked, RoHS compliant.

**TE** TECHNOLOGY, INC.®

1590 Keane Drive  
Traverse City, MI 49696-8257  
[www.tetech.com](http://www.tetech.com)

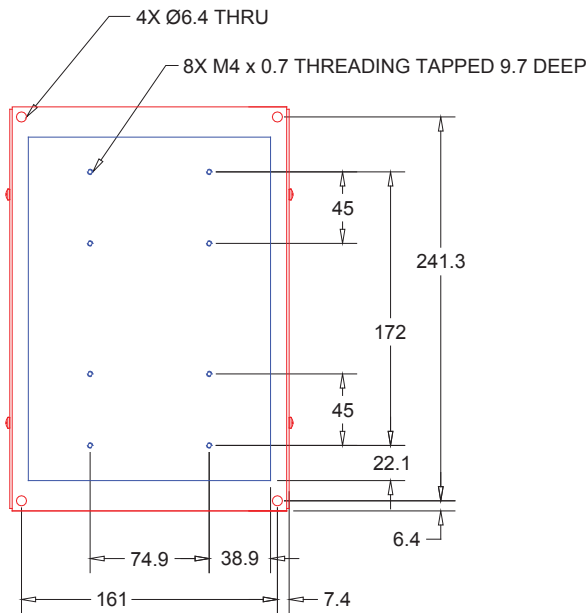
TEL: 231-929-3966  
FAX: 231-929-4163  
email: [cool@tetech.com](mailto:cool@tetech.com)

## CP-200HT-TT Specifications

TE Power (typical) <sup>1</sup> :	24 VDC at 14.1 A	NEMA Rating:	NA
TE Power (maximum) <sup>2</sup> :	24 VDC at 17.4 A		
Hot-side Fan Power:	24 VDC at 1.0 A	Weight (kg):	6.7
Please review the product manual: <i>Thermoelectric Cooling Assembly (TCA) Instruction Manual</i> , FAQ's and related technical information, and ordering information posted on our web site before purchasing or using this product.		Performance is based on unrestricted air flow to fan and from air-flow outlets. Do not operate if cold-plate temperature exceeds 100 °C or the heat-sink temperature exceeds 70 °C. Do not operate fan at air temperatures below -10 °C or above +70 °C.	

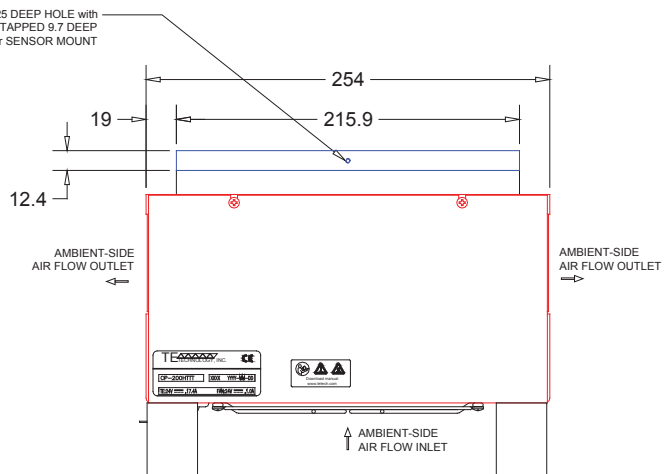
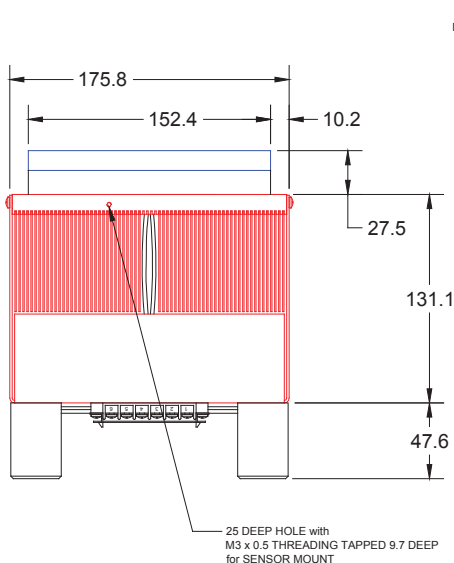
<sup>1</sup>Current, at steady-state, is rated at +25 °C ambient, +25 °C cold plate, maximum heat removal. At -26 °C cold plate, the typical steady-state current is 13.6 A.

<sup>2</sup>Current, at steady-state operation under-worst case conditions, is rated at -10 °C ambient, +100 °C cold plate, maximum heat removal.



### NOTES:

1. All dimensions in millimeters.
2. Cold side shown in blue; hot side shown in red.
3. A 3D PDF, .igs, and .slpdrf solid models are also available from the website. Contact TE Technology for 3D solid models in STEP or SAT format.



RoHS Compliant  
Directive 2002/95/EC

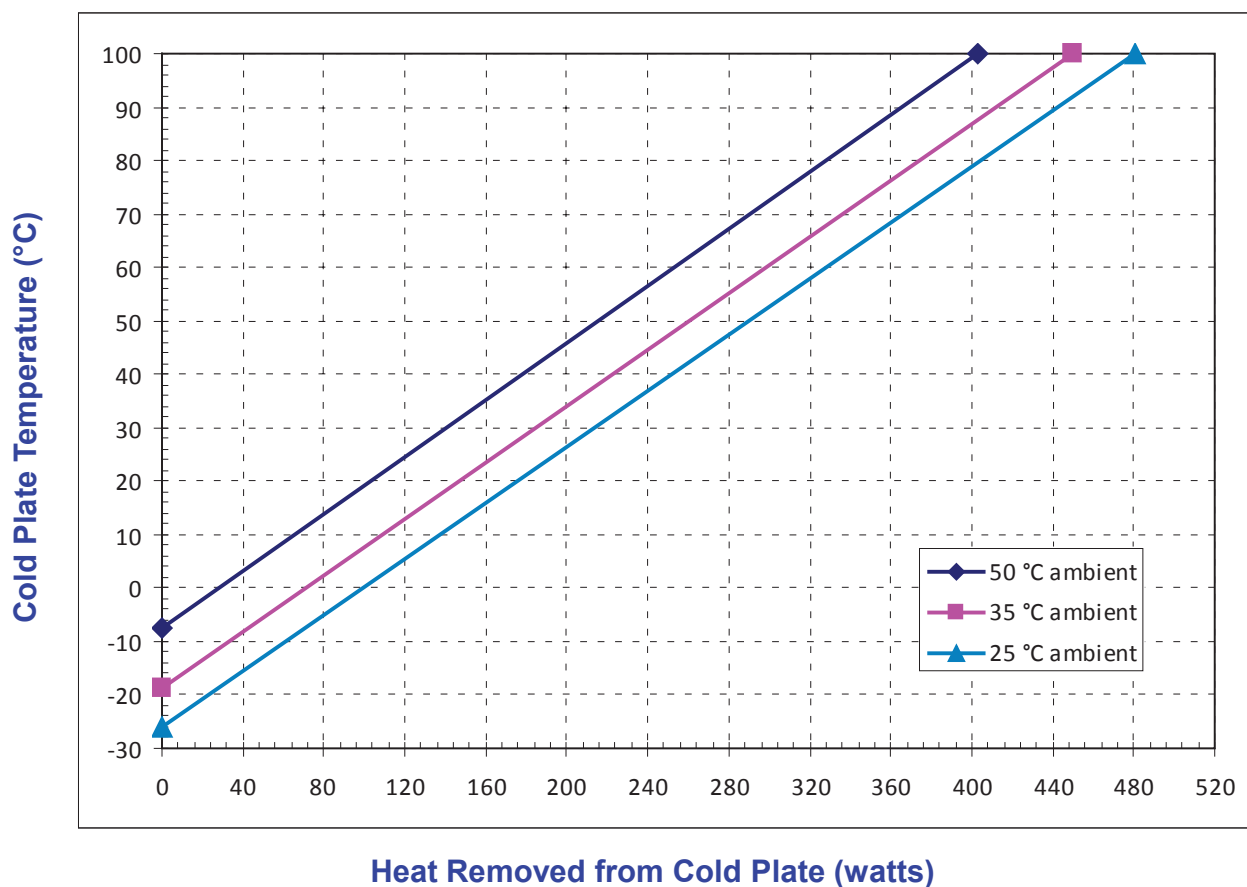
**TE** TECHNOLOGY, INC.®

1590 Keane Drive  
Traverse City, MI 49696-8257  
[www.tetech.com](http://www.tetech.com)

TEL: 231-929-3966  
FAX: 231-929-4163  
email: [cool@tetech.com](mailto:cool@tetech.com)

## CP-200HT-TT Cooling Performance Graph

(removing heat from cold plate)



### How to use the Performance Graph:

#### 1. Select Performance Line.

The diagonal lines shown represent cooling performance at the indicated ambient air temperature. If the cooler is to operate at a different ambient, then you must sketch in a new performance line. This can be drawn parallel to one of the existing lines, using the distance between the existing lines as a scale to properly locate the new line.



#### 2. Select Cold Plate Temperature.

Draw a horizontal line on the graph from the vertical axis corresponding to the desired cold-plate temperature until it intersects with the performance line corresponding to the ambient temperature at which the cooler is to operate.



#### 3. Determine Cooling Capacity.

The maximum amount of heat that the cooler can remove from the cold plate is determined by drawing a vertical line from the intersection point (determined in the previous step) down to the horizontal axis of the graph. *If the heat load dissipating into the cold plate exceeds the cooling capacity, then the cooler will not be able to maintain the desired cold plate temperature.*

Example: You need to maintain the cold plate at 15 °C while in a 25 °C ambient. The cooler can remove a maximum of approximately 160 W of heat from the cold plate. If the heat load (heat source connected to the cold plate plus the heat gain through insulation, solar, vapor condensation, etc.) exceeds this, you would need more coolers and/or a larger cooler.

**TE** TECHNOLOGY, INC.®

1590 Keane Drive  
Traverse City, MI 49696-8257  
[www.tetech.com](http://www.tetech.com)

TEL: 231-929-3966  
FAX: 231-929-4163  
email: [cool@tetech.com](mailto:cool@tetech.com)





DOWNLOADS

FAQ & TECHNICAL INFO

CUSTOM / OEM

SEARCH

ABOUT

CUSTOMER SUPPORT

► **Temperature Controllers** ► TC-36-25-RS232

- HOME
- PELTIER - THERMOELECTRIC COOLER MODULE CALCULATOR
- COOLING ASSEMBLY AND HEAT LOAD CALCULATOR
- CUSTOM OEM COOLING ASSEMBLIES
- AIR COOLERS (7)
- COLD PLATE COOLERS (10)
- LIQUID COOLERS (4)
- POWER SUPPLIES (9)
- PELTIER - THERMOELECTRIC COOLER MODULES (121)
- TEMPERATURE CONTROLLERS (11)**
- THERMISTORS (8)
- COOLER ACCESSORIES (3)

**Show Cart**

Your Cart is currently empty.



**TC-36-25-RS232**

\$478.00		Number
Quantity	Price	pieces in
1 - 9	\$478.00	packaging:1
10 - 49	\$459.00	Number
50 - 99	\$452.00	pieces in
100 - 249	\$435.00	box:1
250+	CALL	

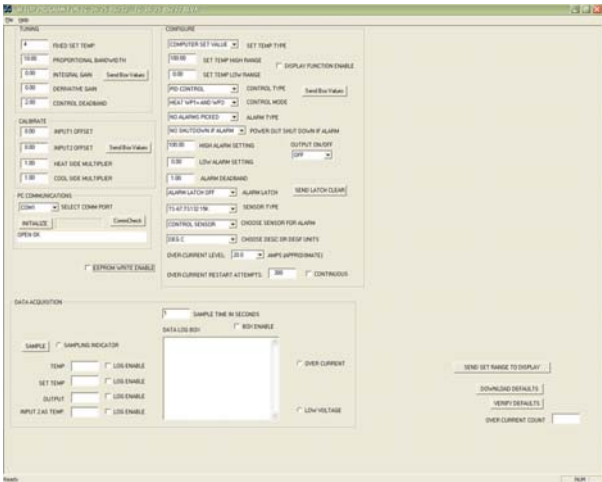
Quantity:

**Add to Cart**

The TC-36-25-RS232 comes with one MP-3193 thermistor. If you would like to purchase additional thermistors, please indicate when ordering.

**APPLICATION**  
The TC-36-25-RS232 provides bi-directional temperature control for thermoelectric devices, either independently or with supplemental resistive heaters for both cooling and heating applications. The controller uses solid-state MOSFET devices in an electrical "H" bridge configuration to automatically control the direction of current simply based on the temperature set point.

The controller can be communicated with and programmed directly through a personal computer's RS232 serial communication port. The supplied communications software,



compatible with Windows 95/98/XP/NT, provides a graphical user interface; no prior programming experience is required to use it. However, the command set is provided so that qualified personnel can use it as an embedded control or can create a custom program interface using LabVIEW, for example.

Once the desired controller parameters are established, the settings can be saved to non-volatile memory. The TC-36-25-RS232 can then be disconnected from the computer and operated as a unique, stand alone controller. The controller can also be configured to use a variety of analog inputs to adjust the set point.

Mechanically, the controller's printed circuit board is mounted to a metal bracket that is suitable for either horizontal or vertical orientation. The controller can operate in ambient temperatures from 0 °C up to 60 °C without generally requiring additional heat sinking.

#### TECHNICAL DESCRIPTION

**Low voltage TE device control capability.** The TC-36-25-RS232 requires an input voltage anywhere from 12 V up to 36 V. That voltage powers the microprocessor and can also be modulated and sent to the thermoelectric device. However, if the thermoelectric cooler or Peltier device operates on a voltage lower than 12 V, a second low-voltage power supply can be connected. The controller will then switch this voltage on and off to the TE device. The second input voltage can range anywhere from 0 V to 36 V.

**High resolution and Stability.** The output signal to the thermoelectric cooler is pulse-width modulated (PWM) at 2700 Hz. The PWM control scheme affords temperature resolution of 0.01 °C or 0.01 °F and best-case controller stability within  $\pm 0.01$  °C or  $\pm 0.01$  °F. The controller tuning structure allows designation of a variety of control features: manual, proportional, proportional-integral, proportional-derivative, or proportional-integral-derivative control. Differential temperature control is also available when two input sensing thermistors are used.

**Accepts a wide variety of thermistors.** The controller comes with a standard 15k ohm thermistor which provides a control temperature range of -20 °C to 100 °C. However, the controller can be used with a wide variety of other NTC type thermistors which are pre-programmed and selected via a menu in the software. For example, a 5k ohm thermistor can also be used to extend the control temperature down to -40 °C. Also, since many laser diode packages come standard with a 10k thermistor, there are two different 10k thermistor settings available.

**Remote control capability.** Once the controller is programmed, it can run independent of a computer, and the set point can be adjusted in several ways. The optional MP-2986 Display and Keypad accessory can be used to adjust the set point and provide a digital readout of the set point and the sense temperature. The controller can also use a potentiometer, a 0 to 5 VDC signal, or a 0 to 20 mA current loop.

**Configurable alarm actions.** Several alarm types may be selected: no alarm, tracking alarm, and fixed value alarm. The alarm can be configured to either maintain the output power during an alarm or to shut down the power output. The alarm latch can be selected to either automatically restart power if the alarm clears itself or to keep the power output off until the latch is manually cleared. The controller can also provide a 25 mA signal for powering an LED or other device when an alarm occurs.

**Over-current protection.** In addition to alarm protection, the controller can provide over-current protection to the TE device. The setting can be adjusted in 2.5 A increments. The maximum current the controller can handle is 25 A at steady state.

#### SPECIFICATIONS

RoHS Compliant

Bi-directional, solid-state "H"-bridge configuration for heating and cooling applications

Input voltage from 12 to 36 VDC or 0 to 36 VDC with a secondary power supply

Self-contained, 0.1 to 25 A load rating, with over-current protection

Computer programmable via RS232 communications port or stand-alone operation without a computer

Control temperature of -20 °C to 100 °C, other ranges available with optional thermistors

Proportional (P), Integral (I) and Derivative (D) control

Temperature resolution and best-case control stability of 0.01 °C

Pulse-width modulation frequency at 2700 Hz

5K, 10K, and 15K ohm thermistor capability

Set temperature adjustable via:

Remote user set temperature potentiometer

4 to 20 mA current loop

0 V to 5 V adjustable range

Differential temperature control

MP-2986 Display and Keypad accessory

No computer programming experience required to use the communications software program

Command set is provided so programmers may create their own software interface or embedded controller applications (sample LabVIEW source code, version 2011 and higher, is available upon request)

Computer configurable alarms

Non-volatile memory retention of parameters

Operating temperature range of 0 °C to 60 °C, storage temperature range of -55 °C to 105 °C

[Download TC-36-25 RS232 Manual](#)



[Download Temperature Sensor Attachment Manual](#)



**Download TC-36-25 RS232 Software** (See also **Software License Agreement**)

**TC-36-25 RS232 3D Model in .pdf format** (Requires Adobe Reader 8.0 or higher)



**3D PDF MODEL:** Click on the link above to download a 3D model. You can rotate and view the cooler from any angle to better understand the physical properties of the product. (However, wire leads are not shown in the model.) This is a portable document format (.pdf) file, Adobe Reader 8 or higher is all that is required for viewing. You may be prompted by Adobe Reader to do a one-time upgrade to Version 8.0 or for 3D model support components. 3D content may initially appear as a two-dimensional preview image. Clicking the 3D model with the Hand or Select tool enables (or activates) the model and opens the 3D toolbar.

3D Solid Models
<b>SolidWorks:</b> <a href="#">TC-36-25 RS232.sldprt</a>
<b>IGES:</b> <a href="#">TC-36-25 RS232.igs</a>

**This product can be used with:**

**MP-2986 Display + Keypad**



\$136.00

**RS232 Adapter**



\$46.00

**MP-3193**



\$24.00

**MP-2444**



\$14.00

**MP-2996**



\$19.00

**MP-2542**



\$13.00





[Requirements and Compatibility](#) | [Ordering Information](#) | [Detailed Specifications](#)

For user manuals and dimensional drawings, visit the product page resources tab on ni.com.

Last Revised: 2010-02-09 14:44:16.0

## 4-Channel, 14 S/s, 24-Bit, $\pm 80$ mV C Series Thermocouple Input Module

NI 9211



- 4 thermocouple or  $\pm 80$  mV analog inputs
- -40 to 70 °C operating range
- 24-bit resolution; 50/60 Hz noise rejection
- Hot-swappable operation
- NIST-traceable calibration

### Overview

The NI 9211 C Series thermocouple input module for use with NI CompactDAQ and CompactRIO chassis includes a 24-bit delta-sigma ADC, antialiasing filters, open-thermocouple detection, and cold-junction compensation for high-accuracy thermocouple measurements. It contains NIST-traceable calibration and a channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range.

[Back to Top](#)

### Requirements and Compatibility

#### OS Information

- Real-Time OS
- Windows

#### Driver Information

- NI-DAQmx
- NI-RIO

#### Software Compatibility

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- SignalExpress
- Visual Basic
- Visual C#
- Visual C++
- Visual Studio
- Visual Studio .NET

[Back to Top](#)

### Comparison Tables

Thermocouple Module	Channels	Sample Rate	Resolution	Feature
NI 9213	16	1,200 S/s	24-bit	Lowest cost/channel
NI 9219	4	50 S/s/ch	24-bit	Channel-to-channel isolation
NI 9211	4	14 S/s	24-bit	Low-channel count

[Back to Top](#)

## Application and Technology

High-accuracy C Series analog input modules for NI CompactDAQ and CompactRIO provide high-performance measurements for a wide variety of industrial, in-vehicle, and laboratory sensors and signal types. Each module includes built-in signal conditioning and an integrated connector with screw terminal or cable options for flexible and low-cost signal wiring. All modules feature CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings.

### C Series Compatibility

The C Series hardware family features more than 50 measurement modules and several chassis and carriers for deployment. With this variety of modules, you can mix and match measurements such as temperature, acceleration, flow, pressure, strain, acoustic, voltage, current, digital, and more to create a custom system. Install the modules in one of several carriers to create a single module USB, Ethernet, or Wi-Fi system, or combine them in chassis such as NI CompactDAQ and CompactRIO to create a mixed-measurement system with synchronized measurements. You can install up to eight modules in a simple, complete NI CompactDAQ USB data acquisition system to synchronize all of the analog output, analog input, and digital I/O from the modules. For a system without a PC, CompactRIO holds up to eight modules and features a built-in processor, RAM, and storage for an embedded data logger or control unit. For higher-speed control, CompactRIO chassis incorporate a field-programmable gate array (FPGA) that you can program with NI LabVIEW software to achieve silicon-speed processing on I/O data from C Series modules.

### Advanced Features

When used with CompactRIO, C Series analog input modules connect directly to reconfigurable I/O (RIO) FPGA hardware to create high-performance embedded systems. The reconfigurable FPGA hardware within CompactRIO provides a variety of options for custom timing, triggering, synchronization, filtering, signal processing, and high-speed decision making for all C Series analog modules. For instance, with CompactRIO, you can implement custom triggering for any analog sensor type on a per-channel basis using the flexibility and performance of the FPGA and the numerous arithmetic and comparison function blocks built into the LabVIEW FPGA Module.

### Key Features

- High-accuracy, high-performance analog measurements for any CompactRIO embedded system, R Series expansion chassis, or NI CompactDAQ chassis
- Screw terminals, BNC, D-Sub, spring terminals, strain relief, high voltage, cable, solder cup backshell, and other connectivity options
- Available channel-to-earth ground double-isolation barrier for safety, noise immunity, and high common-mode voltage range
- CompactRIO Extreme Industrial Certifications and Ratings
- Built-in signal conditioning for direct connection to sensors and industrial devices

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) or [ni.com/compactdaq](http://ni.com/compactdaq) for up-to-date information on module availability, example programs, application notes, and other developer tools.

### Connectivity Accessories

NI CompactDAQ and CompactRIO systems are designed to provide flexible options for low-cost field wiring and cabling. Most C Series modules have a unique connector block option that offers secure connections to your C Series system. Table 2 contains all of the connector blocks available for C Series I/O modules.

Accessory	Description
NI 9932	10-position strain relief and high-voltage screw-terminal connector kit
NI 9933	37-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9934	25-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9935	15-pin D-Sub connector kit with strain relief and D-Sub shell
NI 9936	10-position screw-terminal plugs (quantity 10)
NI 9939	16-position connector kit with strain relief
<b>Note:</b> To meet shock and vibration requirements, you must affix ferrules to the ends of the wires on all screw-terminal connectors.	

Table 2. Connector Blocks for C Series I/O Modules

Table 3 lists the recommended connector block accessories for each C Series analog input module.

C Series Analog Input Module	Recommended Module Accessory
NI 9201	NI 9932, NI 9936
NI 9201 with D-Sub	NI 9934 <sup>1</sup>
NI 9211	NI 9932, NI 9936
NI 9215	NI 9932, NI 9936
NI 9217	NI 9939
NI 9221	NI 9932, NI 9936
NI 9221 with D-Sub	NI 9934 <sup>1</sup>
<sup>1</sup> Requires a 25-pin D-Sub connector such as the NI 9934 accessory kit.	

Table 3. Recommended Connector Block Accessories

The NI 9932 kit provides strain relief and operator protection from high-voltage signals for any 10-position screw-terminal module.



Figure 1. NI 9932 10-Position Strain Relief and High-Voltage Screw-Terminal Connector Kit

The NI 9936 consists of 10-position screw-terminal plugs for any 10-position screw-terminal module.



Figure 5. NI 9936 10-Position Screw-Terminal Plugs

Visit [ni.com/compactrio](http://ni.com/compactrio) or [ni.com/compactdaq](http://ni.com/compactdaq) for up-to-date information on accessories.

[Back to Top](#)

## Ordering Information

For a complete list of accessories, visit the product page on [ni.com](http://ni.com).

Products	Part Number	Recommended Accessories	Part Number
No accessories required.			

[Back to Top](#)

## Software Recommendations

### LabVIEW Professional Development System for Windows



- Advanced software tools for large project development
- Automatic code generation using DAQ Assistant and Instrument I/O Assistant
- Tight integration with a wide range of hardware
- Advanced measurement analysis and digital signal processing
- Open connectivity with DLLs, ActiveX, and .NET objects
- Capability to build DLLs, executables, and MSI installers

[Back to Top](#)

## Support and Services

### System Assurance Programs

NI system assurance programs are designed to make it even easier for you to own an NI system. These programs include configuration and deployment services for your NI PXI, CompactRIO, or Compact FieldPoint system. The NI Basic System Assurance Program provides a simple integration test and ensures that your system is delivered completely assembled in one box. When you configure your system with the NI Standard System Assurance Program, you can select from available NI system driver sets and application development environments to create customized, reorderable software configurations. Your system arrives fully assembled and tested in one box with your software preinstalled. When you order your system with the standard program, you also receive system-specific documentation including a bill of materials, an integration test report, a recommended maintenance plan, and frequently asked question documents. Finally, the standard program reduces the total cost of owning an NI system by providing three years of warranty coverage and calibration service. Use the online product advisors at [ni.com/advisor](http://ni.com/advisor) to find a system assurance program to meet your needs.

## Calibration

NI measurement hardware is calibrated to ensure measurement accuracy and verify that the device meets its published specifications. To ensure the ongoing accuracy of your measurement hardware, NI offers basic or detailed recalibration service that provides ongoing ISO 9001 audit compliance and confidence in your measurements. To learn more about NI calibration services or to locate a qualified service center near you, contact your local sales office or visit [ni.com/calibration](http://ni.com/calibration).

## Technical Support

Get answers to your technical questions using the following National Instruments resources.

- **Support** - Visit [ni.com/support](http://ni.com/support) to access the NI KnowledgeBase, example programs, and tutorials or to contact our applications engineers who are located in NI sales offices around the world and speak the local language.
- **Discussion Forums** - Visit [forums.ni.com](http://forums.ni.com) for a diverse set of discussion boards on topics you care about.
- **Online Community** - Visit [community.ni.com](http://community.ni.com) to find, contribute, or collaborate on customer-contributed technical content with users like you.

## Repair

While you may never need your hardware repaired, NI understands that unexpected events may lead to necessary repairs. NI offers repair services performed by highly trained technicians who quickly return your device with the guarantee that it will perform to factory specifications. For more information, visit [ni.com/repair](http://ni.com/repair).

## Training and Certifications

The NI training and certification program delivers the fastest, most certain route to increased proficiency and productivity using NI software and hardware. Training builds the skills to more efficiently develop robust, maintainable applications, while certification validates your knowledge and ability.

- **Classroom training in cities worldwide** - the most comprehensive hands-on training taught by engineers.
- **On-site training at your facility** - an excellent option to train multiple employees at the same time.
- **Online instructor-led training** - lower-cost, remote training if classroom or on-site courses are not possible.
- **Course kits** - lowest-cost, self-paced training that you can use as reference guides.
- **Training memberships** and training credits - to buy now and schedule training later.

Visit [ni.com/training](http://ni.com/training) for more information.

## Extended Warranty

NI offers options for extending the standard product warranty to meet the life-cycle requirements of your project. In addition, because NI understands that your requirements may change, the extended warranty is flexible in length and easily renewed. For more information, visit [ni.com/warranty](http://ni.com/warranty).

## OEM

NI offers design-in consulting and product integration assistance if you need NI products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit [ni.com/oem](http://ni.com/oem).

## Alliance

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 700 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit [ni.com/alliance](http://ni.com/alliance).

[Back to Top](#)

## Detailed Specifications

The following specifications are typical for the range -40 to 70 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics	
Number of channels	4 thermocouple channels, 1 internal autozero channel, 1 internal cold-junction compensation channel
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma
Sampling mode	Scanned
Voltage measurement range	±80 mV
Temperature measurement ranges	Works over temperature ranges defined by NIST (J, K, T, E, N, B, R, S thermocouple types)
Conversion time	70 ms per channel; 420 ms total for all channels including the autozero and cold-junction channels
Common-mode voltage range	
Channel-to-COM	±1.5 V
COM-to-earth ground	±250 V
Common-mode rejection ratio (0 to 60 Hz)	
Channel-to-COM	95 dB

COM-to-earth ground	>170 dB
Input bandwidth (–3 dB)	15 Hz
Noise rejection (at 50 and 60 Hz)	85 dB min
Overvoltage protection	±30 V between any input and COM
Differential input impedance	20 MΩ
Input current	50 nA
Input noise	1 $\mu\text{V}_{\text{rms}}$
Gain error	0.05% max at 25 °C, 0.06% typ at –40 to 70 °C, 0.1% max at –40 to 70 °C
Offset error (with autozero channel on)	15 $\mu\text{V}$ typ, 20 $\mu\text{V}$ max
Gain error from source impedance	Add 0.05 ppm per $\Omega$ when source impedance >50 $\Omega$
Offset error from source impedance	Add 0.05 $\mu\text{V}$ typ, 0.07 $\mu\text{V}$ max per $\Omega$ source impedance >50 $\Omega$
Cold-junction compensation sensor accuracy	
0 to 70 °C	0.6 °C typ, 1.3 °C max
–40 to 70 °C	1.7 °C max
MTBF	633,012 hours at 25 °C; Bellcore Issue 2, Method 1, Case 3, Limited Part Stress Method



**Note** Contact NI for Bellcore MTBF specifications at other temperatures or for MIL-HDBK-217F specifications.

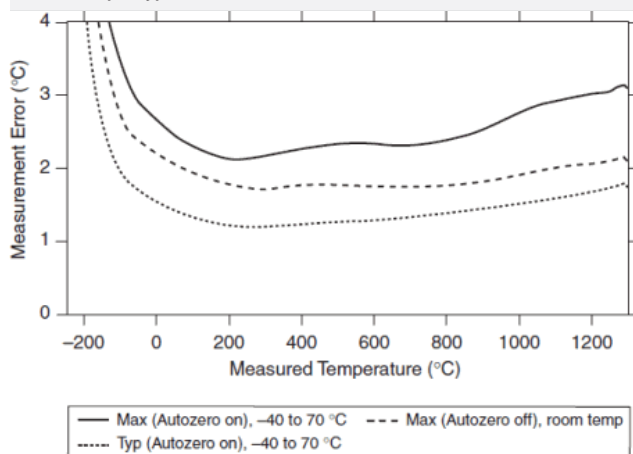
## Temperature Measurement Accuracy

### Measurement sensitivity <sup>1</sup>

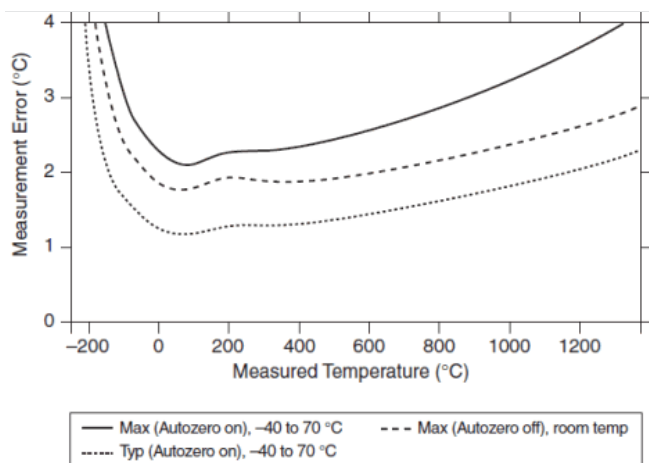
With autozero channel on	
Types J, K, T, E, N	<0.07 °C
Types B	<0.25 °C
Types R, S	<0.60 °C
With autozero channel off	
Types J, K, T, E, N	<0.05 °C
Types B	<0.20 °C
Types R, S	<0.45 °C

The following figures show the typical and maximum errors for each thermocouple type when used with the NI 9211 over the full temperature range. The figures also display the maximum errors for the thermocouple types with the NI 9211 at room temperature, which is 15 to 35 °C. The figures account for gain errors, offset errors, differential and integral nonlinearity, quantization errors, noise errors, and isothermal errors. The figures do not account for the accuracy of the thermocouple itself.

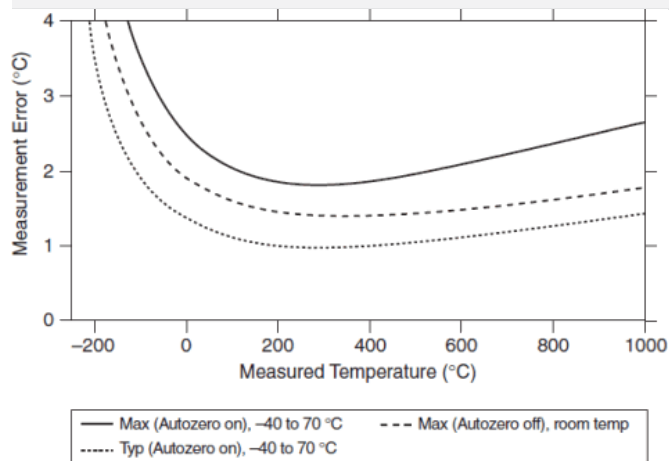
### Thermocouple Types J and N Errors



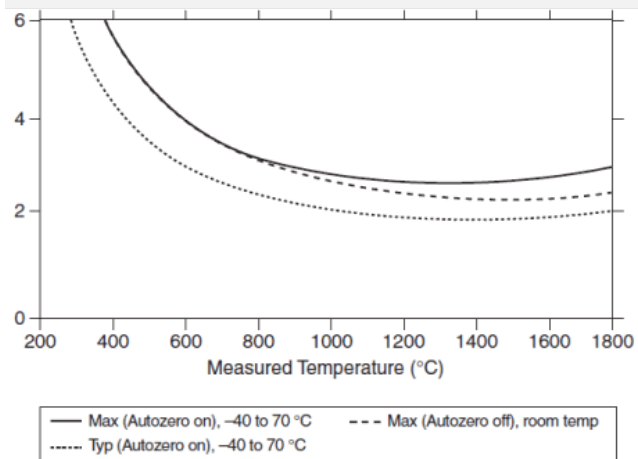
### Thermocouple Type K Errors



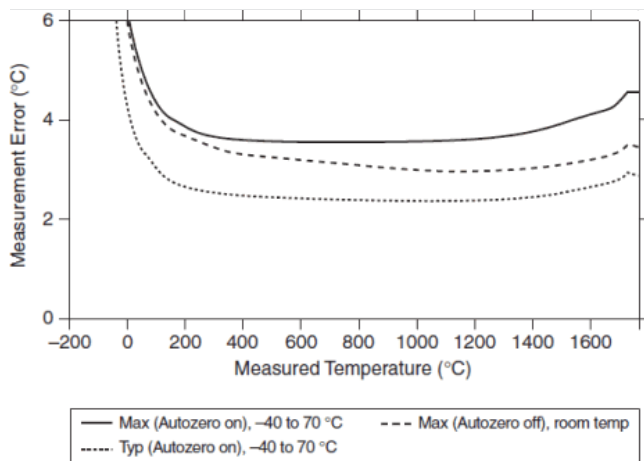
Thermocouple Types T and E Errors



Thermocouple Type B Errors



Thermocouple Types R and S Errors



## Power Requirements

Power consumption from chassis

Active mode	170 mW max
Sleep mode	4 mW max

Thermal dissipation (at 70 °C)

Active mode	170 mW max
Sleep mode	4 mW max

## Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.



**Note** For two-dimensional drawings and three-dimensional models of the C Series module and connectors, visit [ni.com/dimensions](https://ni.com/dimensions) and search by module number.

Screw-terminal wiring	12 to 24 AWG wire with 10 mm (0.39 in.) of insulation stripped from the end
Torque for screw terminals	0.5 to 0.6 N · m (4.4 to 5.3 lb · in.)
Ferrules	0.25 mm <sup>2</sup> to 2.5 mm <sup>2</sup>
Weight	150 g (5.3 oz)

## Safety

### Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits.

Channel-to-COM	±30 V max
Isolation	
Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	
Continuous	250 V <sub>rms</sub> , Measurement Category II
Withstand	2,300 V <sub>rms</sub> , verified by a 5 s dielectric withstand test

Measurement Category II is for measurements performed on circuits directly connected to the electrical distribution system (MAINS<sup>2</sup>). This category refers to local-level electrical distribution, such as that provided by a standard wall outlet (for example, 115 AC voltage for U.S. or 230 AC voltage for Europe). Examples of Measurement Category II are measurements performed on household appliances, portable tools, and similar hardware.



**Caution** Do *not* connect the NI 9211 to signals or use for measurements within Measurement Categories III or IV.

### Hazardous Locations

U.S. (UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, AEx nC IIC T4
Canada (C-UL)	Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, T4; Class I, Zone 2, Ex nC IIC T4
Europe (DEMKO)	EEx nC IIC T4

### Safety Standards

This product is designed to meet the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

## Electromagnetic Compatibility

This product is designed to meet the requirements of the following standards of EMC for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326 (IEC 61326): Class A emissions; Industrial immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.



**Note** For EMC compliance, operate this device with double-shielded cables.

## CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as amended for CE marking, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)



**Note** For the standards applied to assess the EMC of this product, refer to the *Online Product Certification* section.

## Online Product Certification

Refer to the product Declaration of Conformity (DoC) for additional regulatory compliance information. To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by module number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Shock and Vibration

To meet these specifications, you must panel mount the system and either affix ferrules to the ends of the terminal wires or use the NI 9932 backshell kit to protect the connections.

Operating vibration

Random (IEC 60068-2-64)	5 g <sub>rms</sub> , 10 to 500 Hz
Sinusoidal (IEC 60068-2-6)	5 g, 10 to 500 Hz
Operating shock (IEC 60068-2-27)	30 g, 11 ms half sine, 50 g, 3 ms half sine, 18 shocks at 6 orientations

## Environmental

National Instruments C Series modules are intended for indoor use only but may be used outdoors if installed in a suitable enclosure. Refer to the manual for the chassis you are using for more information about meeting these specifications.

Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	–40 to 70 °C
Storage temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	–40 to 85 °C
Ingress protection	IP 40
Operating humidity (IEC 60068-2-56)	10 to 90% RH, noncondensing
Storage humidity (IEC 60068-2-56)	5 to 95% RH, noncondensing
Maximum altitude	2,000 m
Pollution Degree (IEC 60664)	2

## Environmental Management

National Instruments is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial not only to the environment but also to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *NI and the Environment* Web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

## Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



**EU Customers** At the end of their life cycle, all products *must* be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit [ni.com/environment/weee.htm](http://ni.com/environment/weee.htm).

### 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。  
关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息, 请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。  
(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

## Calibration

You can obtain the calibration certificate for this device at [ni.com/calibration](http://ni.com/calibration).

Calibration interval

1 year



<sup>1</sup> Measurement sensitivity represents the smallest change in temperature that a sensor can detect. It is a function of noise. The values assume the full measurement range of the standard thermocouple sensor according to ASTM E230-87.

<sup>2</sup> MAINS is defined as a hazardous live electrical supply system that powers hardware. Suitably rated measuring circuits may be connected to the MAINS for measuring purposes.

[Back to Top](#)

---

©2010 National Instruments. All rights reserved. CompactRIO, CVI, FieldPoint, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, NI CompactDAQ, and SignalExpress are trademarks of National Instruments. The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from National Instruments and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with National Instruments.

[My Profile](#) | [RSS](#) | [Privacy](#) | [Legal](#) | [Contact NI](#) © 2012 National Instruments Corporation. All rights reserved.





Ventas  
España  
91 640 0085  
ni.spain@ni.com

## NI 9215

### Módulo de Entrada Analógica de 4 canales, 100 kS/s/canal, 16 bits, $\pm 10$ V

- Operación intercambiable en vivo (hot-swappable)
- Resolución de 16 bits
- Rango de operación de -40 a 70 °C
- Certificados de calibración trazable expedidos por el NIST
- 4 entradas analógicas muestreadas simultáneamente, 100 kS/s

## Información General

El módulo NI 9215 para uso con chasis NI CompactDAQ y CompactRIO incluye cuatro canales de entrada analógica muestreados simultáneamente y registro sucesivo de aproximación (SAR) de 16 bits ADCs. Este módulo contiene certificados de calibración trazable expedidos por el NIST, doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad, inmunidad a ruido y alto rango de voltaje de modo común.

## Especificaciones

### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones
- Hoja de Especificaciones

### Resumen de Especificaciones

General	
Producto	NI 9215
Familia de Productos	E/S Industrial
Formato Físico	CompactDAQ , CompactRIO
Número de Parte	779011-01
Sistema Operativo/Objetivo	Windows , Real-Time
Tipos de Medida	Voltaje
Tipo de Aislamiento	Aislamiento de Canal a Tierra
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	

Canales	4 , 0
Canales de una sola terminal	0
Canales Diferenciales	4
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	100 kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	0.003 V
Muestreo Simultáneo	Sí
Salida Analógica	
Canales	0
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	0
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	0
Especificaciones Físicas	
Longitud	9 cm
Ancho	2.3 cm
Conector de E/S	Terminales de tornillo , Conectores BNC
Temperatura de Operación	-40 °C
Temperatura de Operación	70 °C
Temperatura de Almacenamiento	-40 °C
Temperatura de Almacenamiento	85 °C
Temporización/Disparo/Sincronización	
Dispara Chasis cDAQ	No



Ventas  
España  
91 640 0085  
ni.spain@ni.com

## NI 9263

### Módulo de Salida Analógica de Actualización Simultánea de 4 Canales, 100 kS/s, 16 bits, $\pm 10$ V

- Operación intercambiable en vivo (hot-swappable)
- 4 salidas analógicas actualizadas simultáneamente, 100 kS/s
- Resolución de 16 bits
- Rango de operación de -40 a 70 °C
- Certificados de calibración trazable expedidos por el NIST



## Información General

El NI 9263 de National Instruments es un módulo de salida analógica de actualización simultánea de 4 canales a 100 kS/s para cualquier chasis NI CompactDAQ o CompactRIO. El NI 9263 también cuenta con protección de sobrevoltaje de  $\pm 30$  V, protección de corto circuito, baja interferencia entre canales (crosstalk), rápida velocidad de respuesta, alta precisión relativa y certificados de calibración trazable expedidos por el NIST. Este módulo incluye doble barrera de aislamiento de canal a tierra para seguridad e inmunidad a ruido.

## Especificaciones

### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones
- Hoja de Especificaciones

### Resumen de Especificaciones

General	
Producto	NI 9263
Familia de Productos	E/S Industrial
Formato Físico	CompactDAQ , CompactRIO
Número de Parte	779012-01
Sistema Operativo/Objetivo	Real-Time , Windows
Tipos de Medida	Voltaje

Tipo de Aislamiento	Aislamiento de Canal a Tierra
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	
Canales	0
Canales de una sola terminal	0
Canales Diferenciales	0
Salida Analógica	
Canales	4
Resolución	16 bits
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	0.11 V
Rango de Voltaje Mínimo	-10 V , 10 V
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	0.11 V
Razón de Actualización	100 kS/s
Capacidad de Corriente Simple	1 mA
Capacidad de Corriente Total	4 mA
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	0
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	0
Especificaciones Físicas	
Longitud	9 cm
Ancho	2.3 cm
Conector de E/S	Terminales de tornillo
Temperatura de Operación	-40 °C
Temperatura de Operación	70 °C

Temperatura de Almacenamiento	-40 °C
Temperatura de Almacenamiento	85 °C
Temporización/Disparo/Sincronización	
Dispara Chasis cDAQ	No







Ventas  
España  
91 640 0085  
ni.spain@ni.com

## NI 9375

### Módulo de 16 Canales de Entrada Digital y 16 Canales de Salida Digital de 24 V

- Entradas digitales tipo sinking de 16 canales a 7  $\mu$ s
- Salida digital tipo "sourcing" de 16 canales de 500  $\mu$ s
- Compatibilidad con niveles de entrada 12 V y 24 V
- Rango de salida de 6 V a 30 V (en base al voltaje suministrado)
- Operación intercambiable en vivo (hot-swappable)
- Rango de operación de -40 °C a 70 °C



## Información General

El NI 9375 es un módulo de combinación de entrada digital y salida de digital que funciona con NI CompactDAQ o CompactRIO. Cada una de las 16 líneas de entrada digital dedicada es compatible con niveles de lógica de 12 V y 24 V. Todas las 16 líneas de salida digital dedicadas son compatibles con señales de 6 V a 30 V, en base a la fuente de alimentación externa. Aunque las líneas de entrada digital y salida digital comparten el mismo motor de temporización, es importante reconocer que la línea de salida digital tiene un retraso de propagación máximo de 500  $\mu$ s (ver el manual para más detalles). El NI 9375 ofrece 60 V de aislamiento entre los bancos de entrada y salida y tiene aislamiento continuo de 1,000 Vrms desde el canal a tierra. Funciona con niveles lógicos y señales industriales para conexión directa a una amplia variedad de conmutadores, transductores y dispositivos industriales.

#### Accesorios

- El NI 9375 con conector D-SUB requiere de un juego de conector D-SUB de 37 pines de montaje frontal, como el del juego de accesorios NI 9923 o una solución cableada que consista en un cable y bloque terminal. Usted puede encontrar ambas opciones en la sección de Precios para este módulo.

-El NI 9375 con terminales de resorte no requiere de un juego de conector adicional, pero usted puede encontrar bloques conectores de reemplazo y el NI 9974 en la sección de Precios.

-Para esta salida digital se requiere una fuente de alimentación externa en el rango de 6 V a 30 V. Usted puede usar la misma fuente de alimentación para este módulo y el chasis CompactRIO o NI CompactDAQ observando que el voltaje y la potencia disponibles sean apropiados. El voltaje proporcionado estipula el voltaje de salida del módulo.

#### Contenido del NI 9375

-Módulo NI 9375

-Manual del usuario impreso

## Especificaciones

### Documentos con Especificaciones

- Especificaciones (2)

### Resumen de Especificaciones

#### General

#### Producto

NI 9375

Familia de Productos	E/S Industrial , E/S Digital
Formato Físico	CompactRIO , CompactDAQ
Número de Parte	781030-01 , 779801-01
Tipos de Medida	Digital
Tipo de Aislamiento	Aislamiento de Canal a Tierra
Compatibilidad con RoHS	Sí
Entrada Analógica	
Canales	0
Canales de una sola terminal	0
Canales Diferenciales	0
Salida Analógica	
Canales	0
E/S Digital	
Canales Bidireccionales	0
Canales de Entrada Únicamente	16
Canales de Salida Únicamente	16
Temporización	Software , Hardware
Niveles Lógicos	24 V , > 24 V , 12 V , Requires External Power Supply
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking
Salida de Flujo de Corriente	Sourcing
Capacidad de Corriente Simple	400 mA , 500 mA
Capacidad de Corriente Total	125 mA , 100 mA
Máximo Rango de Entrada	0 V , 30 V
Máximo Rango de Salida	6 V , 30 V
Contadores/Temporizadores	
Número de Contadores/Temporizadores	0

## Miniature Linear Motion Series • L12

Firgelli Technologies' unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These small linear actuators are a superior alternative to designing with awkward gears, motors, servos and linkages.

Firgelli's L series of micro linear actuators combine the best features of our existing micro actuator families into a highly flexible, configurable and compact platform with an optional sophisticated on-board microcontroller. The first member of the L series, the L12, is an axial design with a powerful drivetrain and a rectangular cross section for increased rigidity. But by far the most attractive feature of this actuator is the broad spectrum of available configurations.



### Benefits

- Compact miniature size
- Simple control using industry standard interfaces
- Low voltage
- Equal push / pull force
- Easy mounting

### Applications

- Robotics
- Consumer appliances
- Toys
- Automotive
- Industrial automation

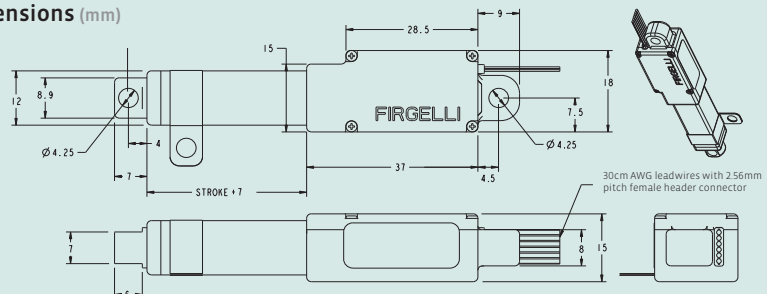
### L12 Specifications

Gearing Option	50	100	210	
Peak Power Point <sup>1</sup>	12 N @ 11 mm/s	23 N @ 6 mm/s	45 N @ 2.5 mm/s	
Peak Efficiency Point	6 N @ 16 mm/s	12 N @ 8 mm/s	18 N @ 4 mm/s	
Max Speed (no load)	23 mm/s	12 mm/s	5 mm/s	
Backdrive Force <sup>2</sup>	43 N	80 N	150 N	
Stroke Option	10 mm	30 mm	50 mm	100 mm
Weight	28 g	34 g	40 g	56 g
Positional Accuracy	0.1 mm	0.2 mm	0.2 mm	0.3 mm
Max Side Force (fully extended)	50 N	40 N	30 N	15 N
Mechanical Backlash	0.1 mm			
Feedback Potentiometer	2.75 kΩ/mm ± 30%, 1% linearity			
Duty Cycle	20 %			
Lifetime	1000 hours at rated duty cycle			
Operating Temperature	-10°C to +50°C			
Storage Temperature	-30°C to +70°C			
Ingress Protection Rating	IP-54			
Audible Noise	55 dB at 45 cm			
Stall Current	450 mA at 5 V & 6 V, 200 mA at 12 V			

<sup>1</sup> 1 N (Newton) = 0.225 lb, (pound-force)

<sup>2</sup> a powered-off actuator will statically hold a force up to the Backdrive Force

### Dimensions (mm)



### Firgelli Technologies Inc.

580 Starling Lane  
Victoria, BC, V9E 2A9  
Canada

1 (206) 347-9684 phone

1 (888) 225-9198 toll-free

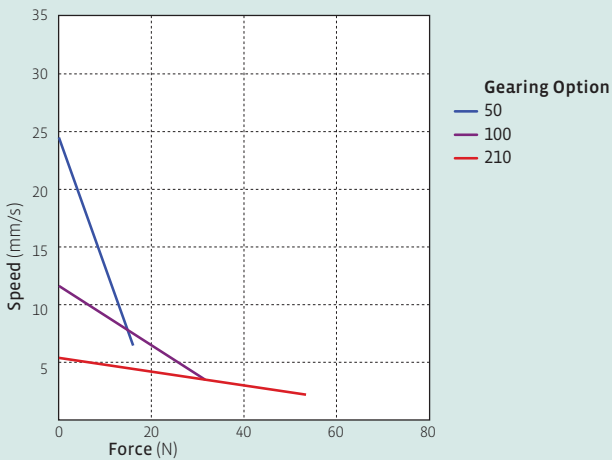
1 (206) 347-9684 fax

sales@firgelli.com

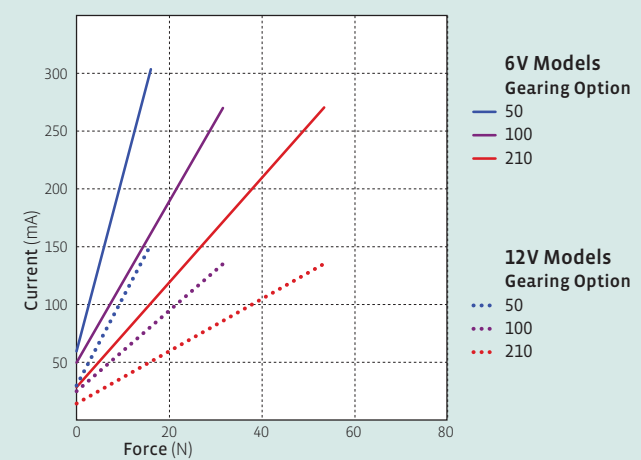
www.firgelli.com

## L12 Specifications

Load Curves



Current Curves



## Model Selection

The L12 has five configurable features. L12 configurations are identified according to the following scheme:

### L12-SS-GG-VV-C-L

feature	options
<b>SS:</b> Stroke Length (in mm)	<b>10, 30, 50, 100</b> Any stroke length between 10 and 100 mm is available on custom orders, in 2 mm increments.
<b>GG:</b> Gear reduction ratio (refer to force/speed plots)	<b>50, 100, 210</b> Other gearing options may be possible on custom orders.
<b>VV:</b> Voltage	<b>06</b> 6V (5V power for Controller options B and P) <b>12</b> 12V
<b>C:</b> Controller	<b>B</b> Basic 2-wire open-loop interface, no position feedback, control, or limit switching. Positive voltage extends, negative retracts. <b>S</b> 2-wire open-loop interface (like B option) with limit switching at stroke endpoints. <b>P</b> Simple analog position feedback signal, no on-board controller. <b>I</b> Integrated controller with Industrial and RC servo interfaces (see L12 Controller Options section). Not available with 10mm stroke length configurations. <b>R</b> RC Linear Servo. Not available with 10mm stroke or 12 volts.
<b>L:</b> Mechanical or electrical interface customizations	Custom option codes will be issued by Firgelli for custom builds when applicable.

## Basis of Operation

The L12 actuator is designed to move push or pull loads along its full stroke length. The speed of travel is determined by the gearing of the actuator and the load or force the actuator is working against at a given point in time (see Load Curves chart on this datasheet). When power is removed, the actuator stops moving and holds its position, unless the applied load exceeds the backdrive force, in which case the actuator will backdrive. Stalling the actuator under power for short periods of time (several seconds) will not damage the actuator. Do not reverse the supply voltage polarity to actuators containing an integrated controller (I controller option).

Each L12 actuator ships with two mounting clamps, two mounting brackets and two rod end options: a clevis end and a threaded end with nut (see drawing on page 4). When changing rod ends, extend the actuator completely and hold the round shaft while unscrewing the rod end. Standard lead wires are 28 AWG, 30 cm long with 2.56 mm (0.1") pitch female header connector (Hi-Tec™ and Futaba™ compatible). Actuators are a sealed unit (IP-54 rating, resistant to dust and water ingress but not fully waterproof).

## Ordering information

Sample quantities may be ordered with a credit card directly from [www.firgelli.com](http://www.firgelli.com).

Please contact Firgelli at [sales@firgelli.com](mailto:sales@firgelli.com) for volume pricing or custom configurations.

Note that not all configuration combinations are stocked as standard products. Please refer to [www.firgelli.com/orders](http://www.firgelli.com/orders) for current inventory.

## L12 Controller options

### Option B—Basic 2-wire interface

#### WIRING:

**1** (red) **Motor V+** (5V or 12V)

**2** (black) **Motor ground**

The –B actuators offer no control or feedback mechanisms. While voltage is applied to the motor V+ and ground leads, the actuator extends. If the polarity of this voltage is reversed, the actuator retracts. The 5 V actuator is rated for 5 V but can operate at 6 V.

### Option S—Basic 2-wire interface

#### WIRING:

**1** (red) **Motor V+** (5V or 12V)

**2** (black) **Motor ground**

When the actuator moves to a position within 0.5mm of its fully-retracted or fully-extended stroke endpoint, a limit switch will stop power to the motor. When this occurs, the actuator can only be reversed away from the stroke endpoint. Once the actuator is positioned away from its stroke endpoint, normal operation resumes. For custom orders, limit switch trigger positions can be modified at the time of manufacture, in 0.5mm increments.

### Option P—Position feedback signal

#### WIRING:

**1** (orange) **Feedback potentiometer negative reference rail**

**2** (purple) **Feedback potentiometer wiper** (position signal)

**3** (red) **Motor V+** (5V or 12V)

**4** (black) **Motor ground**

**5** (yellow) **Feedback potentiometer positive reference rail**

The –P actuators offer no built-in controller, but do provide an analog position feedback signal that can be input to an external controller. While voltage is applied to the motor V+ and ground leads, the actuator extends. If the polarity of this voltage is reversed, the actuator retracts. Actuator stroke position may be monitored by providing any stable low and high reference voltages on leads 1 and 5, and then reading the position signal on lead 2. The voltage on lead 2 will vary linearly between the two reference voltages in proportion to the position of the actuator stroke.

### Option I—Integrated controller with industrial and RC servo interfaces

#### WIRING:

**1** (green) **Current input signal** (used for 4–20 mA interface mode)

**2** (blue) **Voltage input signal** (used for the 0–5V interface mode and PWM interface modes)

**3** (purple) **Position Feedback signal** (0–3.3 V, linearly proportional to actuator position)

**4** (white) **RC input signal** (used for RC-servo compatible interface mode)

**5** (red) **Motor V+** (+6 Vdc for 6 V models, +12 Vdc for 12 V models)

**6** (black) **Ground**

The –I actuator models feature an on-board software-based digital microcontroller. The microcontroller is not user-programmable.

The six lead wires are split into two connectors. Leads 4, 5 and 6 terminate at a universal RC servo three-pin connector (Hi-Tec™ and Futaba™ compatible). Leads 1, 2 and 3 terminate at a separate, similarly sized connector.

When the actuator is powered up, it will repeatedly scan leads 1, 2, 4 for an input signal that is valid under any of the four supported interface modes. When a valid signal is detected, the actuator will self-configure to the corresponding interface mode, and all other interface modes and input leads are disabled until the actuator is next powered on.

**0–5V Interface Mode:** This mode allows the actuator to be controlled with just a battery, and a potentiometer to signal the desired position to the actuator – a simple interface for prototypes or home automation projects. The desired actuator position (setpoint) is input to the actuator on lead 2 as a voltage between ground and 5V. The setpoint voltage must be held on lead 2 until the desired actuator stroke position is reached. Lead 2 is a high impedance input.

**4–20 mA Interface Mode:** This mode is compatible with PLC devices typically used in industrial control applications. The desired actuator position (setpoint) is input to the actuator on lead 1 as a current between 4 mA and 20 mA. The setpoint current must be held on lead 1 until the desired actuator stroke position is reached.

**RC Servo Interface Mode:** This is a standard hobby-type remote-control digital servo interface (CMOS logic), compatible with servos and receivers from manufacturers like Futaba™ and Hi-Tec™. The desired actuator position is input to the actuator on lead 4 as a positive 5 Volt pulse width signal. A 1.0 ms pulse commands the controller to fully retract the actuator, and a 2.0 ms pulse signals full extension. If the motion of the actuator, or of other servos in your system, seems erratic, place a 1–4Ω resistor in series with the actuator's red V+ leadwire.

**PWM Mode:** This mode allows control of the actuator using a single digital output pin from an external microcontroller. The desired actuator position is encoded as the duty cycle of a 5 Volt 1 kHz square wave on actuator lead 2, where the % duty cycle sets the actuator position to the same % of full stroke extension. The waveform must be 0V to +5V in order to access the full stroke range of the actuator.

### Option R—RC Linear Servo

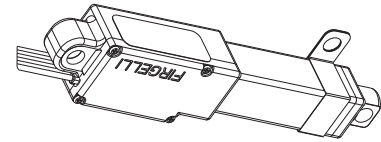
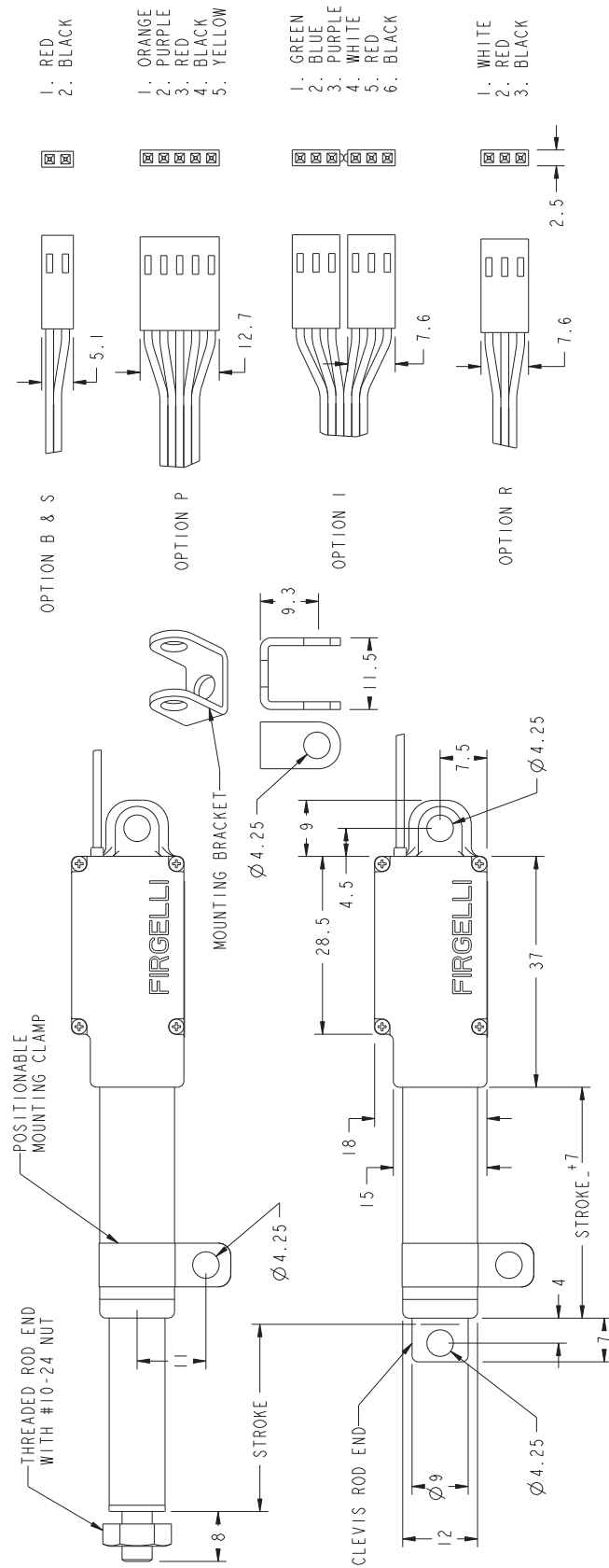
#### WIRING:

**1** (white) **RC input signal**

**2** (red) **Motor V+** (6VOC)

**3** (black) **Ground**

The –R actuators or 'linear servos' are a direct replacement for regular radio controlled hobby servos. Operation is as above in RC servo interface mode (option I). The –R actuators are available in 6 volt and 30, 50 and 100 mm strokes only.



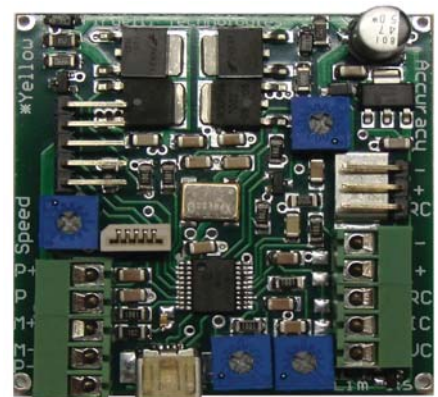
NOTES:

- 1) WHEN CHANGING ROD ENDS, EXTEND ACTUATOR COMPLETELY AND HOLD THE ROUND SHAFT WHILE UNSCREWING THE ROD END PLUG
- 2)  $\varnothing 4.25$  MOUNTING HOLES WILL FIT M4 OR UN #8 SIZE SCREWS
- 3) TWO MOUNTING CLAMPS, TWO MOUNTING BRACKETS, ONE EXTRA THREADED ROD END WITH NUT AND #8-32 HARDWARE, IS INCLUDED WITH EACH ACTUATOR.
- 4) STANDARD LEAD WIRE LENGTH IS 300mm. 28AWG STRANDED RIBBON WIRE. CONNECTORS ARE 2.54mm PITCH FEMALE HEADER CONNECTORS

## LAC • Firgelli Linear Actuator Control Board

The Linear Actuator Control Board is a stand-alone closed-loop control board specifically designed for Firgelli actuators. The LAC greatly simplifies designs by saving the development time, cost, and processor overhead associated with direct motor control. As little as 1 digital or analog output is required for position control. Supported input signals include USB, Voltage, Current, RC Servo, and PWM. Firgelli's motor control IC uses a software based algorithm to optimize position and speed control. This makes the LAC compatible with a wide range of actuators, using only the default settings. Firgelli's Advanced Configuration Program allows full customization of actuator response. A stall detection feature provides a great increase in actuator life for applications that may briefly exceed the rated force.

The LAC can be operated as both an interface board, or as a stand alone controller with the addition of an external potentiometer and power supply.

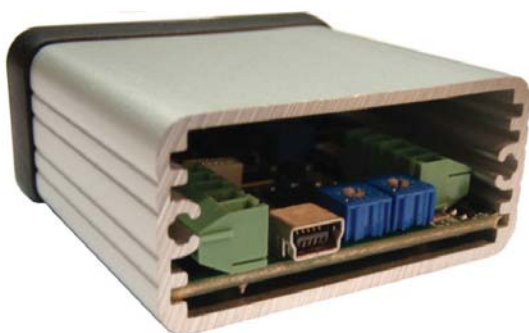


*(Accessory kit and housing sold separately)*

### Specifications

Control input modes	<b>Digital: USB, RC Servo, 1 kHz PWM</b> <b>Analog: 0–3.3 V, 4–20 mA</b>
Controller	<b>10-bit Dual Sample Rate Quasi PD</b>
Compatible actuators	<b>PQ12 Actuators with position feedback, 6 or 12 volts</b> <b>L12–P Actuators with position feedback, 6 or 12 volts</b> <b>L16–P Actuators with position feedback, 12 volts</b> <b>Larger Actuators such as FA-PO-xxx-xxx, 12 or 24 volts</b>
Dimensions	<b>50 mm x 50 mm (excluding battery holder)</b>
Power	<b>5–24 VDC, 4 Amps peak current at 10% duty cycle</b>
Operating environment	<b>–10 to +70°C at 10–80% relative humidity</b>

### Operation



When the LAC is powered up, it will repeatedly scan for an input signal that is valid under any of the five supported interface modes (see reverse for External Connections Detail illustration). When a valid signal is first detected, the actuator will self-configure to the corresponding interface mode, and all other interface modes and input leads are disabled until the actuator is next powered on. The sensitivity or accuracy of the actuator control algorithm can be set by adjusting the “Accuracy” trim potentiometer. Turning clockwise will allow the actuator to move in smaller increments and be more accurate. However, due to the differences in actuator types this may cause jittery or unstable behaviour. If this occurs, consider using the USB configuration program to more finely tune the controller for your application. Each time a control potentiometer is adjusted, power must be cycled to the LAC board prior to the new settings taking effect. Adjusting the “Speed” potentiometer will set the maximum actuator speed. The two “Limits” potentiometers allow user settable digital limit switches. These set the minimum and maximum acceptable positions. Control inputs that exceed these limits will cause the actuator to position to the limit.



#### Firgelli Technologies Inc.

580 Stirling Lane  
Victoria, BC, V9E 2A9  
Canada

1 (206) 347-9684 phone  
1 (888) 225-9198 toll-free  
1 (206) 347-9684 fax

sales@firgelli.com  
www.firgelli.com



## External Connections Detail

### X1 PQ12 actuator connector

5 pin, 1 mm Pitch FPC connector

### X2 L12–P/L16–P actuator connector

Pin Function

- | Pin | Function                                  |
|-----|---|
| 1   | Potentiometer Reference Negative (yellow) |
| 2   | Motor Terminal (black)                    |
| 3   | Motor Terminal (red)                      |
| 4   | Potentiometer Feedback (wiper) (purple)   |
| 5   | Potentiometer Reference Positive (orange) |

### X3 Radio control receiver connector

Pin Function

- | Pin | Function        |
|-----|-----------------|
| 1   | Ground (black)  |
| 2   | Power (red)     |
| 3   | Control (white) |

### X4 Large actuator connector

Pin Function

- | Pin | Function                                 |
|-----|--|
| 1   | Potentiometer Reference Positive (white) |
| 2   | Potentiometer Feedback (wiper) (yellow)  |
| 3   | Motor Terminal (red)                     |
| 4   | Motor Terminal (black)                   |
| 5   | Potentiometer Reference Negative (blue)  |

NOTE: If the actuator moves to one end then stops, swap pins 3 and 4 to change the motor direction.

### X5 Universal Serial Bus (Male Mini-B)

Pin Function

- | Pin | Function |
|-----|----------|
| 1   | N/C      |
| 2   | Data     |
| 3   | Data     |
| 4   | N/C      |
| 5   | Ground   |

## Control Modes

**0–3.3 V Interface Mode:** This mode allows an actuator to be controlled with just a battery, and a potentiometer to signal the desired position to the actuator – a simple interface for prototypes or home automation projects. The desired actuator position (set-point) is input to the LAC on connector X6 pin 5 as a voltage between ground and 3.3 V. The set-point voltage must be held on pin 5 to reach and maintain the desired actuator stroke position. The wiper pin of an external potentiometer connects to X6 pin 5. Pins 1 and 5 of X4 can be used as the 3.3V Reference. The other two potentiometer pins connect to these. When a Potentiometer is not used, ensure the control signal ground is connected to LAC ground.

**RC Servo Interface Mode:** This is a standard hobby-type remote-control digital servo interface, compatible with servos and receivers from manufacturers like Futaba™ and Hi-Tec™. The desired actuator position is input to the LAC on connector X6 pin 3 as a positive 5 Volt pulse-width signal. A 1 ms pulse commands the controller to fully retract the actuator, and a 2 ms pulse signals full extension. Connector X3 can also be used for the RC control signal, and uses the standard 3 pin 0.1" spacing typical on most hobby servo receivers. **Do not connect power to both X6 and X3 at the same time** (If the supply voltages differ, large currents will flow).

### X6 Control interface

Pin Function

- | Pin | Function                                    |
|-----|---|
| 1   | Ground                                      |
| 2   | 5–24 VDC Power                              |
| 3   | RC / Hobby Servo input signal               |
| 4   | Current input signal (4–20 mA)              |
| 5   | Voltage input signal (0–3.3 V) or 1 kHz PWM |

### P1 Speed Control

Sets maximum actuator speed

CW Faster

CCW Slower

### P2 Limit Controls

Left Potentiometer controls Retract Limit

CW Maximum Stroke

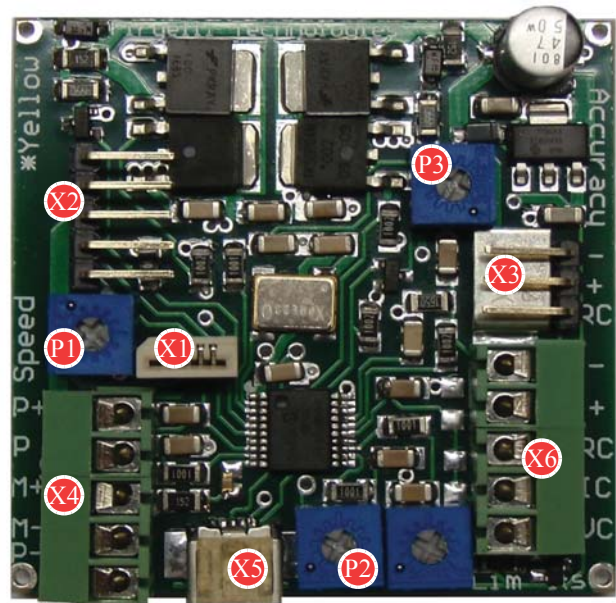
Right Potentiometer controls Extend Limit

CW Maximum Stroke

### P3 Sensitivity adjustment

CW Smaller dead-band

CCW Larger dead-band



Connector Pins numbered from Top to Bottom or Left to Right

**4–20 mA Interface Mode:** This mode is compatible with PLC devices typically used in industrial control applications. The desired actuator position (set-point) is input to the LAC on connector X6 pin 4 as a current between 4 mA and 20 mA. The set-point current must be held on pin 4 to reach and maintain the desired actuator stroke position.

**PWM Mode:** This mode allows control of the actuator using a single digital output pin from an external micro controller. The desired actuator position is encoded as the duty cycle of a 3.3 Volt, 1 kHz square wave on LAC connector X6 pin 5, where the percent duty cycle sets the actuator position to the same percent of full stroke extension. 100% duty cycle represents full extension, and 0% duty cycle represents full retraction. This input is 5V tolerant, however the % duty cycle range will differ.

**USB Mode:** This mode allows control of the actuator using a Computer. In addition advanced settings allow fine control over the controller response. Default settings can be reverted to, using the reset command. When custom settings are turned on, P1, P2, and P3 are ignored. These settings will be saved even when power is cycled. This allows custom configuration for all inputs even when USB is not connected. Details of the DLL are given in a separate document so that custom programs can be created by the customer. An example Labview program is available for download. The Dynamic Link Library(DLL) allows Programming in many windows languages including Labview.



P.O. Box 27  
4300 AA Zierikzee  
The Netherlands

Tel. +31 111 413656  
Fax. +31 111 416919  
www.deltapowersupplies.com

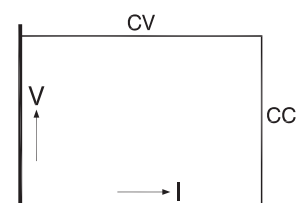


**DELTA ELEKTRONIKA B.V.**



## **S280 - SERIES** EURO - CASSETTE SWITCHED MODE DC POWER SUPPLIES

Models	Voltage range	Current range
S 6-40	0 - 6 V	0 - 40 A
S 15-18	0 - 15 V	0 - 18 A
S 28-10	0 - 28 V	0 - 10 A



### **Features**

- Output programmable from zero till max
- Very high reliability, designed for a long life at full power
- EMC surpasses CE requirements: low emission & high immunity
- Protected against all overload and short circuit conditions
- Very low output ripple and spikes
- Screwdriver adjustment or analog programming
- Master/Slave parallel operation with current sharing

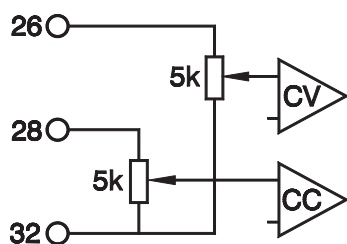
### **Functionalities**

- Optional with external interfaces Ethernet, IEEE488, RS232 or ISO AMP.
- Euro rack mounting or wall mounting
- Redundant parallel operation with a optional RA-10 adapter
- Convection cooling
- Remote sensing

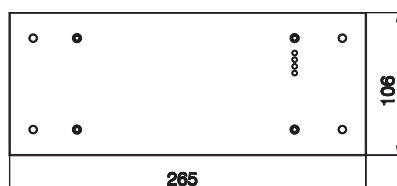
Output		S 6 - 40	S 15 - 18	S 28 - 10
voltage / current		0 - 6 V / 0 - 40 A	0 - 15 V / 0 - 18 A	0 - 28 V / 0 - 10 A
Input				
AC input, full load		100 - 132 V 48 - 62 Hz	100 - 132 V 48 - 62 Hz	100 - 132 V 48 - 62 Hz
DC input		195 - 265 V 48 - 62 Hz contact factory	195 - 265 V 48 - 62 Hz contact factory	195 - 265 V 48 - 62 Hz contact factory
current (220 V AC / 110 V AC) fuse 220 V / 110 V		2.2 / 4.0 Arms 4 AT / 6.3 AT	2.3 / 4.2 Arms 4 AT / 6.3 AT	2.3 / 4.2 Arms 4 AT / 6.3 AT
Efficiency				
AC input, 220 V, full load		80 %	86 %	88 %
Regulation				
Load 0 - 100% Line 198 - 265 V AC	CV CV	5 mV 5 mV	5 mV 5 mV	5 mV 5 mV
Load 0 - 100% Line 198 - 265 V AC	CC CC	30 mA 30 mA	10 mA 10 mA	10 mA 10 mA
Ripple + noise, rms / p-p (BW = 20 MHz)	CV CC	5 / 25 mV 15 / 50 mA	5 / 25 mV 5 / 15 mA	5 / 25 mV 5 / 15 mA
Programming speed 0 → V <sub>max</sub>		10 ms	12 ms	15 ms
Output impedance 0-100 kHz	CV	0.1 Ohm	0.1 Ohm	0.1 Ohm
Temp. coeff., per °C	CV CC		5.10 <sup>-5</sup> 1.10 <sup>-4</sup>	
Stability during 8 hrs after 1 hr warmup	CV CC		5.10 <sup>-4</sup> 1.10 <sup>-3</sup>	

Analog Programming	CV	CC
Programming inputs input range accuracy input impedance	0 - 5 V ± 0.2% - 5 mV / + 12 mV 5 kOhm	0 - 5 V ± 0.5% - 4 mV / + 20 mV 5 kOhm
Monitoring output output range accuracy output impedance	not available	0 - 5 V ± 0.5% - 6 mV / + 0 mV 20 Ohm

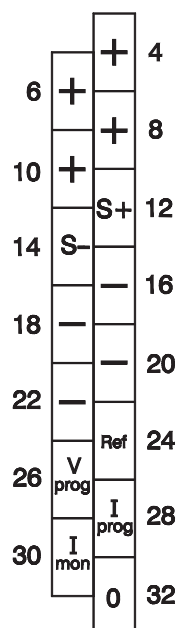
• Recovery time 50 - 100% load step	: S6-40, S28-10 100 µs S15-18 200 µs	• Cooling	: Natural convection cooling, no blower, no noise.
• Insulation Input/Output	: 3750 Vrms (1 min.) 8 mm creepage/clearance	• MTBF	: 500 000 hrs
Input/case	: 2500 Vrms (1 min.)	• Standby input power	: 4 W
Output/case	: 500 V DC	• Hold-up time 100 % load, 220 V AC	: 20 ms
• Safety	: EN 60950 EN 61010	50 % load, 220 V AC	: 40 ms
• EMC Power Supply Standard	: EN 61204-3	• Case	: DIN 41494 / IP20
Generic Emission	: EN 61000-6-3 (EN 55022B)	• Connectors	: H15 (DIN 41612)
Generic Immunity	: EN 61000-6-2	• Dimensions and weight	: Height 106 mm Width 194.5 mm Depth 166 mm Weight 2.8 kg
• Operating ambient temperature	: -20 to +50 °C		
• Thermal protection	: Output shuts down in case of insufficient cooling		
• Series operation	: Max. 500 V total voltage		
• Remote sensing	: Max. 2 V per lead		
• OVP adjust range	: 5 - 35 V		
• Mounting	: Vertical airflow through the unit should not be obstructed		



Internal circuit of programming inputs



FPW front panel for wall mounting



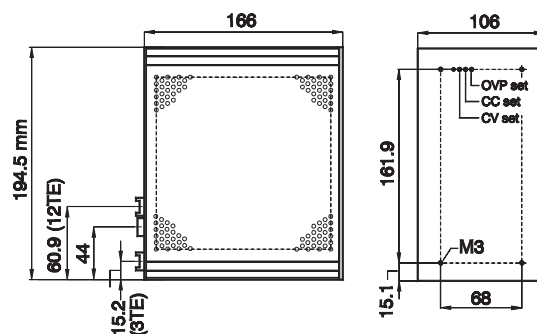
Output connector



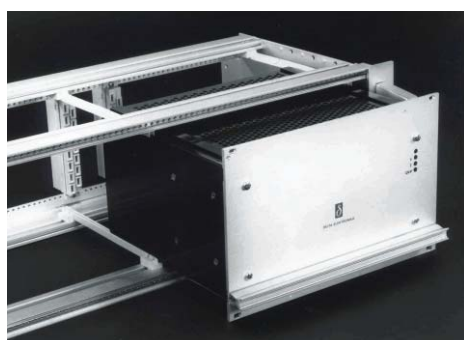
Redundant adapter  
RA 10 for S28 - 10



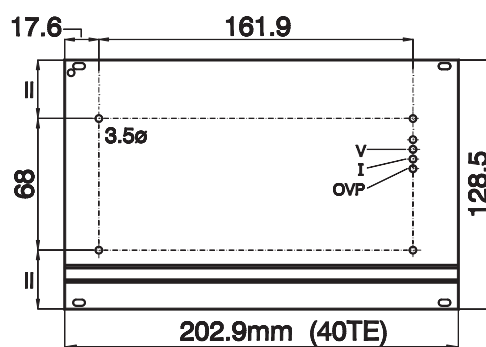
Wall mounting with  
front panel FPW



Dimensions



Eurorack mounting  
with front panel FP40



FP40, front panel for Eurocard-rack



# PRESUPUESTO



## **PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL**

### **Coste de mano de obra**

- Sueldo diario efectivo  
Ingeniero.....90 euros
- Sueldo total : Número de días x Sueldo diario efectivo  
Ingeniero.....365 días x 90 euros = 32850 euros

### **Coste de los materiales y equipo**

Ordenador personal completo.....	1000 euros
Licencia software <i>LabVIEW</i> .....	3000 euros
Lámpara de arco de xenón + carcasa + ventilador.....	1900 euros
Fuente de alimentación lámpara.....	1900 euros
Espejo fuera del eje 90°+ plato adaptador.....	600 euros
Actuador lineal + controlador.....	140 euros
Placa enfriadora ( <i>Cold Plate</i> ) + controlador.....	1100 euros
Fuente placa enfriadora.....	230 euros
Módulos <i>National Instruments</i> .....	2315 euros
Elementos caja de control (caja rack, relés, fuente medida curva IV etc.).....	800 euros
Estructura de la máquina (perfiles, paneles, etc.).....	1400 euros
Ventiladores, filtros, guardadedos, detector de humo + fuente, luz auxiliar .....	500 euros
Panel de control manual.....	520 euros
Cableado, terminales, tapetas.....	300 euros
Trabajo de taller.....	500 euros
Impresión y encuadernación.....	150 euros
Margen para otros componentes (15% de la suma de los costes materiales anteriores).....	2450 euros
 COSTE TOTAL DE LOS MATERIALES.....	 18805 euros
<b>Presupuesto de ejecución material.....</b>	<b>51655 euros</b>

#### **PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATO**

Gastos generales (16% del Presupuesto de Ejecución Material).....8264.8 euros

Beneficio industrial (6% del Presupuesto de Ejecución Material).....3099.3 euros

El presupuesto de ejecución por contrato se calcula como la suma de los gastos generales, el beneficio industrial y el presupuesto de ejecución material.

**Presupuesto de ejecución por contrato.....63019.1 euros**

#### **PRESUPUESTO TOTAL**

El presupuesto total se calcula añadiendo al presupuesto de ejecución por contrato el 21% de IVA.

**Presupuesto total del proyecto.....76253.1 euros**

**El importe total del Proyecto asciende a SETENTA Y SEIS MIL DOSCIENTOS CINCUENTA Y TRES EUROS CON DIEZ CÉNTIMOS**

Fdo. Valentín Pérez Fernández

Ingeniero Superior de Telecomunicación